

**MESTRADO**  
**GESTÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO**

**TRABALHO FINAL DE MESTRADO**  
**PROJETO**

*PROPOSTA DE MODELO  
PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA  
DE ALTA E MÉDIA TENSÃO*

INÊS ISABEL MARTINS CARDOSO

NOVEMBRO - 2020

**MESTRADO**  
**GESTÃO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO**

**TRABALHO FINAL DE MESTRADO**  
**PROJETO**

*PROPOSTA DE MODELO  
PARA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA  
DE ALTA E MÉDIA TENSÃO*

INÊS ISABEL MARTINS CARDOSO

**ORIENTADOR:**  
PROF. CARLOS MANUEL JORGE DA COSTA

NOVEMBRO - 2020



## SUMÁRIO

Atualmente, as redes de distribuição de energia vivem uma grande mudança de paradigma, assente no desenvolvimento sustentável, no aparecimento de novas unidades de produção renováveis e na mudança de redes passivas tradicionais para redes ativas. Esta complexidade e incremento vai original um maior desafio na sua gestão, monitorização e eficiência. Por essa razão, é necessário encontrar novas ferramentas que permitam ajudar no estudo e análise das redes de distribuição. Neste contexto, o projeto realizado aborda a construção e o desenvolvimento de um modelo de dados que simule a topologia da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão no formato de um grafo (i.e., conjunto de nós e arestas), e que posteriormente possa ser utilizado como uma camada de construção e suporte para a elaboração de *use cases* de analítica. De forma a atingir este objetivo, foi elaborado um modelo conceptual, três versões distintas do grafo e um conjunto de *use cases* de analítica relevantes para a visualização, estudo e análise da rede de distribuição. A construção do grafo e o desenvolvimento dos *use cases* analíticos teve por base informação proveniente de um operador de rede de distribuição (ORD).

**PALAVRAS-CHAVE:** Distribuição, Energia, Grafo, Rede

## ABSTRACT

Nowadays, energy distribution networks are undergoing a major paradigm shift, based on sustainable development, emergence of new renewable production units and shift from traditional passive networks to active networks. This complexity and increase will create a greater challenge in its management, monitoring and efficiency. For this reason, it is necessary to find new tools that can help in the study and analysis of distribution networks. In this context, the aim of this project is to construct and develop a data model that simulates the topological structure of high and medium voltage electrical distribution grid in the form of a graph (i.e., a set of nodes and edges) and use it as a construction and support layer for the elaboration of analytical use cases. In order to achieve this objective, a conceptual model, three different versions of the graph and a set of analytical use cases relevant to the visualization, study and analysis of the distribution grid was developed. The construction of the graph and the development of the analytical use cases is based on information provided by a Distribution System Operator (DSO).

**KEY-WORDS:** Distribution, Energy, Graph, Network

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador Professor Carlos Costa, por toda a disponibilidade, orientação e apoio que me forneceu ao longo da elaboração deste projeto.

Gostaria de agradecer também à empresa EDP INOVAÇÃO pelo desafio e pela oportunidade da realização deste trabalho. Um agradecimento especial a todos os elementos da equipa *Smarter Grids* por toda a ajuda, disponibilidade e orientação.

Agradeço também à minha família e aos meus amigos pelo apoio e suporte incondicional ao longo destes meses.

A todos, o meu muito obrigado.

## LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SIGLAS

**AT** – Alta Tensão

**BT** – Baixa Tensão

**DSRM** - *Design Science Research Methodology*

**EDP** – Energias de Portugal

**MAT** – Muito Alta Tensão

**MT** – Média Tensão

**ORD**- Operador da Rede Nacional de Distribuição

**PTC** – Posto de Transformação Cliente

**PTD** – Posto de Transformação Distribuição

**RDBT** – Redes De Distribuição de Eletricidade em Baixa Tensão

**REN** – Redes Energéticas Nacionais

**RND** – Rede Nacional De Distribuição de Alta e Média Tensão

**SITRD** – Sistema de Informação Técnica da Rede de Distribuição

## GLOSSÁRIO

**Alta Tensão** – Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 45kV e igual ou inferior a 110kV

**Baixa Tensão** – Tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1kV

**Linhas** – Elemento destinado a fazer ligação elétrica entre instalações e permitir a veiculação da energia elétrica

**Muito Alta Tensão** – Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 110kV

**Média Tensão** – Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1kV e igual ou inferior a 45kV

**Órgãos de Corte** – Equipamento destinado a isolar troços de rede

**Posto de Seccionamento Corte** – Instalação destinada a realização de seccionamento da rede

**Posto de Transformação** – Ativo que permite converter o nível de tensão da rede MT para a rede BT

**Produtor Central** – Produtor de eletricidade

**Subestação** – Instalações elétricas destinadas a alteração do valor nominal da tensão de saída face à entrada da rede AT



## ÍNDICE

<b>Sumário .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Abreviaturas, Acrónimos e Siglas.....</b>	<b>iv</b>
<b>Glossário.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice .....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>x</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação / Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Abordagem Metodológica .....	2
1.4 Estrutura do Projeto .....	4
<b>2. Revisão da Literatura .....</b>	<b>5</b>
2.1 Redes de Energia .....	5
2.2 Caracterização Da Rede de Distribuição .....	6
2.2.1 Conceitos de Rede e Distribuição de Energia .....	6
2.2.2 Rede Nacional de Distribuição.....	6
2.2.2.1 Rede de Distribuição de Alta Tensão .....	7
2.2.2.2 Rede de Distribuição de Média Tensão .....	7
2.3 Teoria dos Grafos.....	8
2.3.1 Definição.....	8
2.3.2 Aplicabilidade nas Ciências e na Rede Elétrica .....	9
<b>3. Modelo Conceptual .....</b>	<b>12</b>
3.1 Modelo Conceptual para a Modelação do Grafo .....	12
<b>4. Trabalho Empírico .....</b>	<b>14</b>

<b>4.1 Base de Dados e Ferramentas Utilizadas .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2 Modelo Conceptual VS Trabalho Empírico .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3 Construção do Grafo .....</b>	<b>15</b>
4.3.1 Construção do Grafo - Versão I.....	15
4.3.1.1 Estrutura do Grafo .....	16
4.3.1.1.1 Tabela dos Nós .....	16
4.3.1.1.2 Tabela das Arestas .....	16
4.3.1.2 Características do Grafo.....	16
4.3.1.2.1 Atributo Tipo_Ativo.....	16
4.3.1.2.2 Tipos de arestas .....	17
4.3.1.2.3 Ativos representados por duas arestas Self-Loop distintas .....	17
4.3.1.3 Limitações .....	18
4.3.2 Construção do Grafo - Versão II.....	18
4.3.2.1 Montagem da Tabela Rede Arestas II .....	19
4.3.2.1.1 Novos Atributos .....	19
4.3.2.1.2 Novas Arestas.....	19
4.3.2.1.2.1 Processamento das arestas LIGACAO.....	19
4.3.2.1.2.2 Processamento das arestas Troco_MT no sentido inverso .....	20
4.3.2.2 Estrutura do Grafo .....	21
4.3.2.2.1 Tabela dos Nós .....	21
4.3.2.2.2 Tabela das Arestas .....	21
4.3.2.3 Características do Grafo.....	22
4.3.2.3.1 Identificação dos ativos instalações .....	22
4.3.2.3.2 Esquema interno e Esquema Externo .....	23
4.3.2.3.2.1 Definição .....	23
4.3.2.3.2.2 Arestas que fazem a ligação entre o esquema interno e externo.....	23
4.3.2.4 Limitações .....	24
4.3.3 Construção do Grafo - Versão III.....	25
4.3.3.1 Montagem Tabela_Rede_Arestas III.....	25
4.3.3.1.1 Construção do Esquema Interno I.....	25
4.3.3.1.2 Construção do Esquema Interno II.....	26
4.3.3.2 Estrutura do Grafo .....	27
4.3.3.2.1 Tabela dos Nós .....	27
4.3.3.2.2 Tabela das Arestas .....	27
4.3.3.3 Limitações .....	28
4.4 Comparação dos Grafos Construídos .....	28

<b>4.5 Desenvolvimento de Use-Cases a partir do Grafo Versão III .....</b>	<b>29</b>
4.5.1 Use Case Principal – Grafo da Topologia Estática da Subestação.....	29
4.3.1.1 Definição .....	29
4.3.1.2 Processamento .....	29
4.5.1.3 Use Cases Secundários.....	30
4.5.2 Use Case Principal - Grafo da Topologia Dinâmica da Subestação .....	33
4.5.2.1 Definição .....	33
4.5.2.2 Processamento .....	33
4.5.2.3 Use Cases Secundários.....	34
<b>5.     <i>Avaliação Preliminar</i>.....</b>	<b>35</b>
<b>6.     <i>Conclusões e Trabalhos Futuros</i> .....</b>	<b>36</b>
6.1 Conclusões.....	36
6.2 Trabalhos Futuros .....	36
<b>7. <i>Bibliografia</i> .....</b>	<b>38</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo Design Science Research Methodology (Fonte: Vaishnavi et al., 2004).....	2
Figura 2 - Sistema de Geração Centralizado e Distribuído (Fonte: Ehsan & Yang, 2018).....	5
Figura 3 - A estrutura de redes da Internet – Arpanet (Fonte: Easley & Kleinberg, 2010).....	9
Figura 4 - Grafo Hipotético da Rede Elétrica.....	10
Figura 5 - Diagrama de Classes - Modelo Conceptual.....	12
Figura 6 - Comparação da Estrutura do Grafo – Modelo Conceptual VS Trabalho Empírico .....	15
Figura 7 - Comparação entre arestas <i>self-loop</i> e das arestas que estabelecem uma ligação entre dois nós distintos .....	17
Figura 8 - Ativos representados por duas arestas <i>self-loop</i> distintas .....	18
Figura 9 - Exemplo Arestas LIGACAO .....	20
Figura 10 - Exemplo Arestas Troco_MT.....	21
Figura 11 - Conjunto de arestas que representa uma instalação .....	22
Figura 12 - Diferenciação entre esquema interno e esquema externo .....	23
Figura 13 - Representação do Hypernode .....	24
Figura 14 - Comparação do Grafo-Obtido VS Grafo-Expetável.....	25
Figura 15 - Esquema Interno I.....	26
Figura 16 - Exemplo do Esquema Interno II para um PTD.....	27
Figura 17 - Grafo da Topologia Estática da Subestação A.....	30
Figura 18 - Parte do Grafo da Topologia Estática da Subestação A .....	31
Figura 19 - Parte do Grafo da Topologia Estática da Subestação A .....	31
Figura 20 - Parte do Grafo da Topologia Estática da Subestação A .....	32

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I - Ativos da Rede Nacional de Distribuição (Fonte: EDP Distribuição, 2019)	
.....	7
Tabela II - Comparação entre os três grafos realizados.....	28

## *PROPOSTA DE MODELO*

### 1. INTRODUÇÃO

#### *1.1 Motivação / Enquadramento*

Na atualidade, a eletricidade é um dos recursos mais indispensáveis do nosso quotidiano. Desde o seu aparecimento, que a nossa sociedade se foi construindo e modelando à sua volta e devido ao desenvolvimento industrial e tecnológico ocorrido nos últimos anos, estamos cada vez mais dependentes de energia, nomeadamente, energia elétrica. Esta dependência aliada ao constante aumento de consumidores e de novas unidades de produção, refletiu-se de forma exponencial na evolução da rede de distribuição elétrica e em todos os seus equipamentos.

O incremento, a complexidade e a constante evolução da rede de distribuição de energia, aliada com o aumento diário da procura e da oferta de energia torna a rede de distribuição uma possível candidata para a aplicabilidade da teoria dos grafos e de todas as suas funcionalidades. Devido ao seu potencial para analisar, antecipar e resolver possíveis problemas nas redes, a teoria dos grafos é cada vez mais utilizada para mapear e analisar diferentes redes complexas. As propriedades e os conhecimentos proporcionados pela teoria dos grafos podem assim, ser úteis no estudo e análise das redes de distribuição.

Com base nestes pressupostos, este projeto surge em conjunto com a empresa EDP INOVAÇÃO com a finalidade de utilizar a informação proveniente de diversos sistemas de informação para modelar a rede de distribuição de alta e média tensão no formato de um grafo (i.e., conjunto de nós e arestas que descrevem relações entre elementos). Posteriormente, esta modelação poderá ser integrada com outras fontes de informação e ferramentas de modo a identificar possíveis ataques ou falhas na rede, linhas críticas ou efetuar o cálculo do balanço energético tendo em conta a topologia da rede.

#### *1.2 Objetivos*

Este projeto, tem como objetivo principal o desenvolvimento e construção de um modelo de dados que simule sob a forma de um grafo a topologia estática e dinâmica da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão e, que posteriormente possa ser utilizado como uma camada de construção para diferentes *use cases* de analítica. A construção do grafo e dos *use cases* desenvolvidos vai ter por base a informação proveniente de diversos sistemas de informação da empresa EDP.

No âmbito do desenvolvimento do projeto vários requisitos secundários devem ser alcançados: interpretação e mapeamento da informação existente nos diversos sistemas utilizados para a criação do grafo, interligação de todos os elementos presentes no grafo e estruturação das diversas informações num formato de nós e arestas onde seja possível: identificar os ativos da rede e as relações estabelecidas entre si; estabelecer uma hierarquia entre ativos ou escolher um conjunto de ativos de acordo com uma parte da rede de distribuição.

### 1.3 Abordagem Metodológica

O projeto desenvolvido tem por base uma adaptação da abordagem metodológica de *Design Science Research Methodology (DSRM)*. Esta metodologia é definida como sendo um conjunto de técnicas e perspectivas sintéticas e analíticas para realizar, melhorar e entender aspetos e pesquisas em Sistemas de Informação e que envolve geralmente a criação de um artefacto. Os artefactos criados podem incluir modelos, metodologias, instâncias, *frameworks*, arquiteturas, entre outros (Vaishnavi et al., 2004).

Para a elaboração deste projeto foi escolhida a metodologia DSRM proposta por Vaishnavi et al., (2004) que apresenta um processo de cinco fases para atingir os objetivos propostos: Consciencialização do Problema, Sugestão, Desenvolvimento, Avaliação e Conclusão.

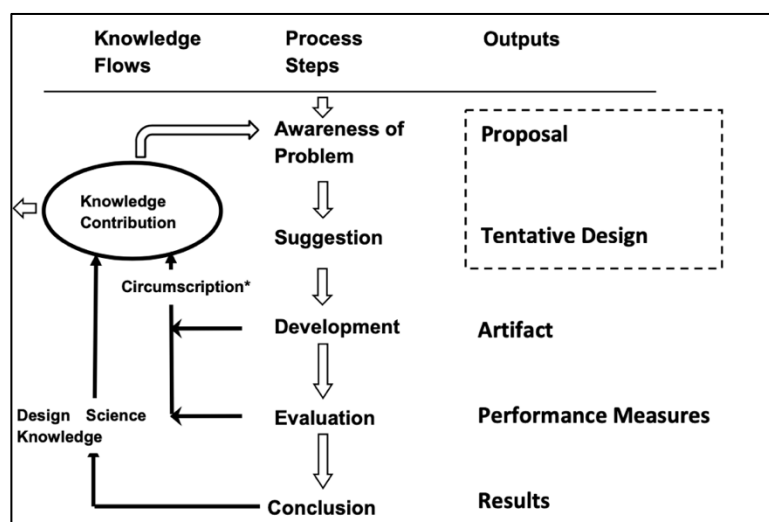


Figura 1 - Modelo Design Science Research Methodology (Fonte: Vaishnavi et al., 2004)

A definição de cada uma das fases do modelo e a respetiva correspondência com as etapas do trabalho desenvolvido é seguidamente apresentada:

1. **Consciencialização do Problema:** Consiste na identificação e reconhecimento de um problema. A consciencialização desse problema pode partir de diversas fontes, incluindo novos desenvolvimentos na indústria ou na identificação de problemas dentro de uma referente disciplina. Como *output* desta fase é elaborada uma proposta, formal ou informal, para um novo esforço de pesquisa (Vaishnavi et al., 2004). No desenvolvimento do projeto, esta fase corresponde ao enquadramento e revisão da literatura do projeto. Como resultado da mesma, foi sugerida uma proposta para a aplicabilidade, desenvolvimento e construção de um modelo de dados que simule sob a forma de um grafo a topologia estática e dinâmica da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão.
2. **Sugestão:** A sugestão é uma etapa criativa em que uma nova funcionalidade é concebida com base numa nova configuração de elementos existentes ou novos. O *output* desta fase é uma tentativa de *design* (Vaishnavi et al., 2004). No projeto, a fase sugestão corresponde ao modelo conceptual que vai permitir definir, contruir e estruturar uma tentativa de *design* para o grafo da rede de distribuição de AT/MT.
3. **Desenvolvimento:** Nesta fase, a tentativa de *design* é desenvolvida e implementada. A fase de desenvolvimento tem como resultado final um artefacto (Vaishnavi et al., 2004). A fase de desenvolvimento vai corresponder à fase do trabalho empírico que vai ter como artefacto final o modelo de dados correspondente ao grafo da rede de distribuição de AT/MT e aos *use cases* desenvolvidos.
4. **Avaliação:** Uma vez construído, o artefacto é avaliado de acordo com os critérios que se encontram implícitos ou explicitados na Proposta. De acordo com a natureza do problema e do artefacto, a avaliação poderá ser realizada de várias formas incluindo métodos quantitativos ou qualitativos (Vaishnavi et al., 2004). A fase da avaliação corresponde à fase da avaliação preliminar do projeto onde o mesmo é avaliado de modo a averiguar se todos os requisitos e expetativas iniciais foram cumpridos.
5. **Conclusão:** Esta fase é caracterizada pelo final de um ciclo de pesquisa ou de um esforço de pesquisa específico que inclui como *output* os resultados (Vaishnavi et al., 2004). A última fase do projeto corresponde à conclusão do mesmo onde ilações do projeto são mencionadas e elaboradas de forma a comunicar os resultados obtidos e possíveis aplicabilidades futuras.



### *1.4 Estrutura do Projeto*

O trabalho desenvolvido no presente projeto encontra-se dividido em sete capítulos distintos.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento, os objetivos e a abordagem metodológica aplicada para a realização deste projeto.

No segundo capítulo é apresentado uma breve síntese da rede de energia e da teoria dos grafos, evidenciando-se de forma mais pormenorizada as características da rede de distribuição de energia AT/MT e a aplicabilidade da teoria dos grafos em redes de grande volume.

No terceiro capítulo é apresentado um modelo conceptual para a estruturação da rede de distribuição de AT/MT no formato de um grafo (nós e arestas).

No quarto capítulo é apresentado a elaboração, o desenvolvimento e a evolução da construção do grafo que simula a topologia estática e dinâmica da rede de distribuição elétrica de AT/MT e os *use cases* desenvolvidos a partir dele.

No quinto capítulo é apresentado uma avaliação preliminar do trabalho realizado.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões gerais do projeto e possíveis desenvolvimentos futuros.

No sétimo capítulo são apresentadas as referências bibliográficas deste projeto.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Redes de Energia

A eletricidade era tradicionalmente fornecida por um sistema de geração de energia centralizado que geralmente comportava unidades de produção de energia em grande escala e uma extensa rede interligada que transportava e distribuía eletricidade para uma variada gama de consumidores domésticos, comerciais e industriais. Este sistema de geração centralizado era caracterizado por ter unidades de produção com grandes capacidades de volume e um fluxo de energia unidirecional. No entanto, nos últimos anos assistiu-se a uma mudança de paradigma neste setor resultante do aparecimento de sistemas de geração distribuída. Estes sistemas são caracterizados por terem unidades de produção de pequena escala conectadas diretamente à rede de distribuição e por permitirem ter fluxos de energia bidirecionais (Ehsan & Yang, 2018).

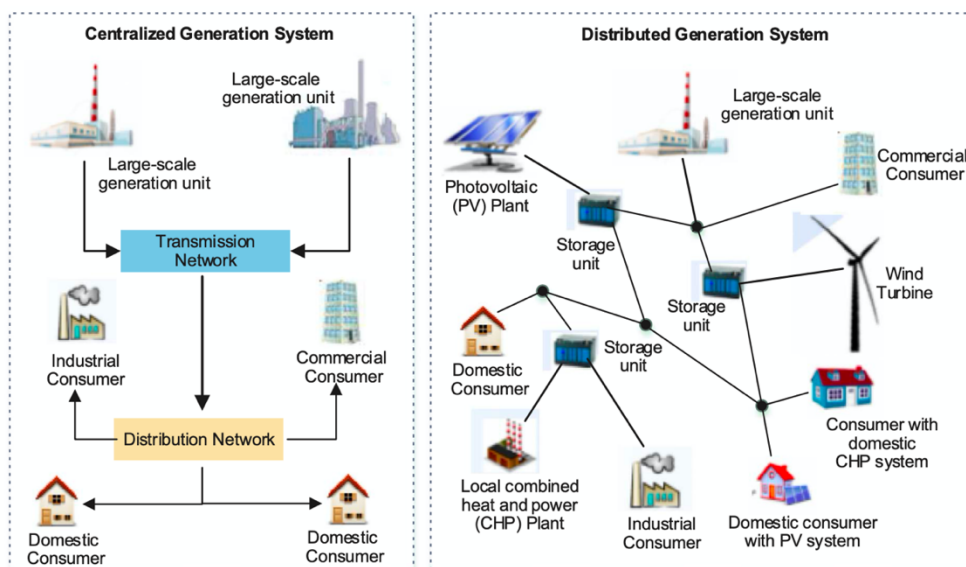


Figura 2 - Sistema de Geração Centralizado e Distribuído (Fonte: Ehsan & Yang, 2018)

O rápido desenvolvimento de tecnologias associadas à geração distribuída em várias formas e capacidades está a reformular o planeamento das redes de distribuição de energia (Ehsan & Yang, 2018). As redes de distribuição de energia encontram-se assim, numa transformação de redes de distribuição passivas para ativas (Evangelopoulos et al., 2016).

Esta grande mudança de paradigma nas redes de distribuição, fundamentada no aparecimento de novas unidades de produção renováveis e num desenvolvimento sustentável, vai fazer com que a rede

de distribuição tenha um papel de extrema relevância. O aumento da complexidade da rede de distribuição vai originar um maior desafio na sua gestão, monitorização e eficiência.

## *2.2 Caracterização Da Rede de Distribuição*

### *2.2.1 Conceitos de Rede e Distribuição de Energia*

A rede é um “conjunto de subestações, linhas, cabos e outros equipamentos elétricos ligados entre si com vista a transportar a energia elétrica produzida pelos produtores centrais até aos consumidores” (EDP Distribuição, 2016). É através do estabelecimento de uma ligação à rede que as instalações elétricas, produtoras ou consumidoras, são integradas nas redes de transporte e distribuição de eletricidade. Em Portugal existem quatro classes de redes de energia elétrica, que são a Baixa Tensão (BT) abaixo de 1000 V, a Média Tensão (MT) entre 1 e 45 kV, a Alta Tensão (AT) entre 45 e 110 kV e a Muito Alta Tensão (MAT) acima de 110 kV (EDP Distribuição, 2018).

Em Portugal, a distribuição de eletricidade processa-se através da exploração da Rede Nacional De Distribuição de Alta e Média Tensão (RND) e das Redes De Distribuição de Eletricidade em Baixa Tensão (RDBT). A rede nacional de distribuição de alta e média tensão é operada através de uma concessão exclusiva atribuída pelo estado, que pertence atualmente à EDP Distribuição (Operador da Rede Nacional de Distribuição-ORD). Relativamente às redes de distribuição de baixa tensão estas são operadas no âmbito de contratos de concessão estabelecidos entre os municípios e os distribuidores (REN, 2020).

### *2.2.2 Rede Nacional de Distribuição*

A Rede de Distribuição é constituída por um conjunto de equipamentos e instalações que permitem distribuir a energia elétrica aos consumidores finais. A Rede Nacional de Distribuição é constituída pela rede de alta tensão e pela rede de média tensão.

Tabela I - Ativos da Rede Nacional de Distribuição (Fonte: EDP Distribuição, 2019)

	2019
<b>Subestações</b>	
Nº de Subestações	431
Nº de Transformadores	782
Potência Instalada (MVA)	17 656
<b>Linhas (incluindo ramais, em km)</b>	
Aéreas	68 116
AT (60/132 kV)	9 029
MT (6/10/15/30 kV)	59 087
Cabos Subterrâneos	15 266
AT (60/132 kV)	539
MT (6/10/15/30 kV)	14 727
<b>Postos de Transformação de Distribuição</b>	
Unidades	69 190
Potência Instalada (MVA)	20 757

#### 2.2.2.1 Rede de Distribuição de Alta Tensão

A rede de distribuição AT permite veicular a energia entre pontos injetores da rede nacional de transporte a as subestações AT/MT, receber a energia injetada por certos produtores e alimentar clientes AT. Por norma, a distribuição em AT é efetuada à tensão de 60 K e a alimentação da rede é assegurada pelas subestações da rede nacional de transporte. Apesar da maioria da rede AT ser aérea, existe uma forte componente subterrânea nas zonas urbanas de Lisboa e Porto (EDP Distribuição, 2016).

#### 2.2.2.2 Rede de Distribuição de Média Tensão

A rede de distribuição MT permite veicular a energia entre as subestações e os postos de transformação públicos e de clientes MT e produtores MT presentes na rede. A distribuição em MT é efetuada, predominantemente, aos níveis de tensão de 30kV, 15kV e 10kV. A rede de média tensão é alimentada a partir das linhas de alta tensão ou postes de corte/seccionamento AT e é explorada radialmente. As redes com estrutura radial são constituídas por linhas que se vão ramificando a partir do ponto de origem. No entanto, as estruturas MT nas redes urbanas ou semiurbanas, devido ao maior

fluxo de carga e maiores consequências associadas a uma situação de avaria, podem ser divididas em outros tipos de estruturas de rede. Na rede MT existem também subestações MT/MT e órgãos de corte (EDP Distribuição, 2016).

## 2.3 Teoria dos Grafos

### 2.3.1 Definição

A teoria dos grafos é um ramo da matemática que estuda as relações entre os objetos de um determinado conjunto. Um grafo  $G = (V(G), E(G))$  é uma estrutura matemática composta por dois conjuntos:  $V(G)$ , conjunto de elementos denominados vértices ou nós e  $E(G)$ , conjunto de pares de elementos de  $V(G)$ . Cada par é denominado de aresta ou arco (Beineke et al., 2004).

Os grafos são geralmente, representados por figuras planas constituídas por linhas, que representam as arestas, e pontos que representam os vértices. O número de vértices e arestas de um grafo designa-se, respetivamente, por ordem e dimensão do grafo (Cardoso, 2005).

Os grafos consoante as suas características e propriedades, podem ser enquadrados em diversos tipos:

1. **Grafo Simples** (grafo que não possui arestas paralelas (i.e., mais do que uma aresta entre os mesmos dois vértices) nem lacetes/*self-loop* (i.e., arestas com ambos os extremos no mesmo vértice) / **Multigrafo** (caso contrário).
2. **Grafo Orientado** (grafo onde as arestas têm direção) / **Grafos Não Orientado** (grafos onde as arestas não tem direção).
3. **Grafo Conexo** (se existe um caminho entre cada par de vértices) / **Grafo Não Conexo/Desconexo** (caso contrário).
4. **Grafo Completo** (grafo com  $n$  vértices no qual todos os pares de vértices são adjacentes).

### 2.3.2 Aplicabilidade nas Ciências e na Rede Elétrica

Ao olharmos ao nosso redor encontramos um leque substancial de aplicações que podem ser modeladas pela teoria dos grafos. Um exemplo, da aplicabilidade dos grafos no mundo real, é a estrutura de rede denominada *Arpanet* que representava sob a forma de um grafo uma rede de comunicação no qual os vértices representam os computadores ou outros dispositivos que estabeleciam troca de informação e as arestas representam as ligações diretas de comunicação entre eles (Easley & Kleinberg, 2010).

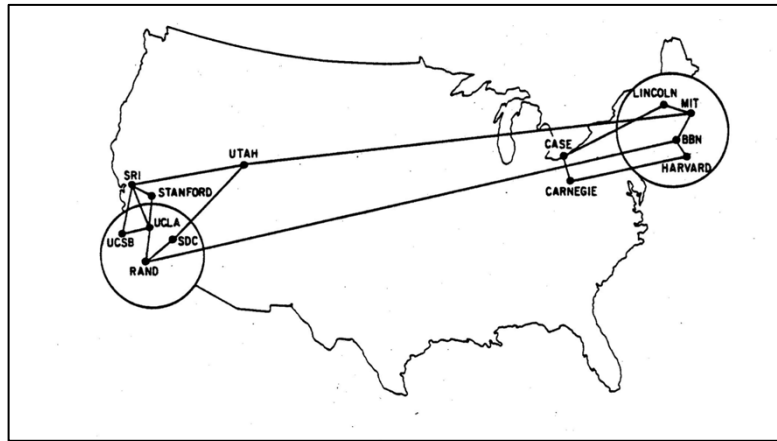


Figura 3 - A estrutura de redes da Internet – Arpanet (Fonte: Easley & Kleinberg, 2010)

Outras redes podem ser aplicadas à teoria dos grafos:

- **Redes nas Ciências da Computação:** Os grafos são utilizados para representar redes de comunicação, de organização de dados, de dispositivos computacionais, entre outros (Riaz & Ali, 2011). Um exemplo prático é a *World Wide Web* onde os vértices representam os recursos de informação como páginas ou documentos da Web e os arcos representam as conexões lógicas entre elas, nomeadamente, os *hiperlinks*, citações ou as referências cruzadas (Easley & Kleinberg, 2010).
- **Redes Sociais:** Os grafos podem ser utilizados para representar redes sociais. As redes sociais incluem redes *online* como *Facebook*, *Twitter*, *LinkedIn*, mas também outras redes como redes de contactos telefónicos ou de e-mail. Por norma, os vértices são as pessoas ou grupos de pessoas e as arestas são as interações ou relações existentes entre elas (Akhtar, 2014).
- **Redes na Biologia:** Os grafos podem ser utilizados na biologia para representar redes biomoleculares, nomeadamente, redes de interações proteicas, redes que regulam as

interações entre os diferentes genes ou redes das reações bioquímicas entre os substratos metabólicos (Mason & Verwoerd, 2007).

- **Redes na Química:** Os grafos podem representar diferentes objetos químicos como moléculas, reações, polímeros (i.e., macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores), entre outros. Um exemplo prático de redes na química é um grafo onde os vértices representam os átomos que constituem uma molécula e as arestas representam as ligações entre esses átomos (Trinajstić, 2018).
- **Redes Elétricas:** Os grafos podem representar as redes elétricas e os seus componentes. Os vértices podem ser por exemplo, os geradores, os barramentos, as cargas, os transformadores ou as subestações e arestas podem ser as linhas de transmissão que conectam esses elementos (Panigrahi, 2013).

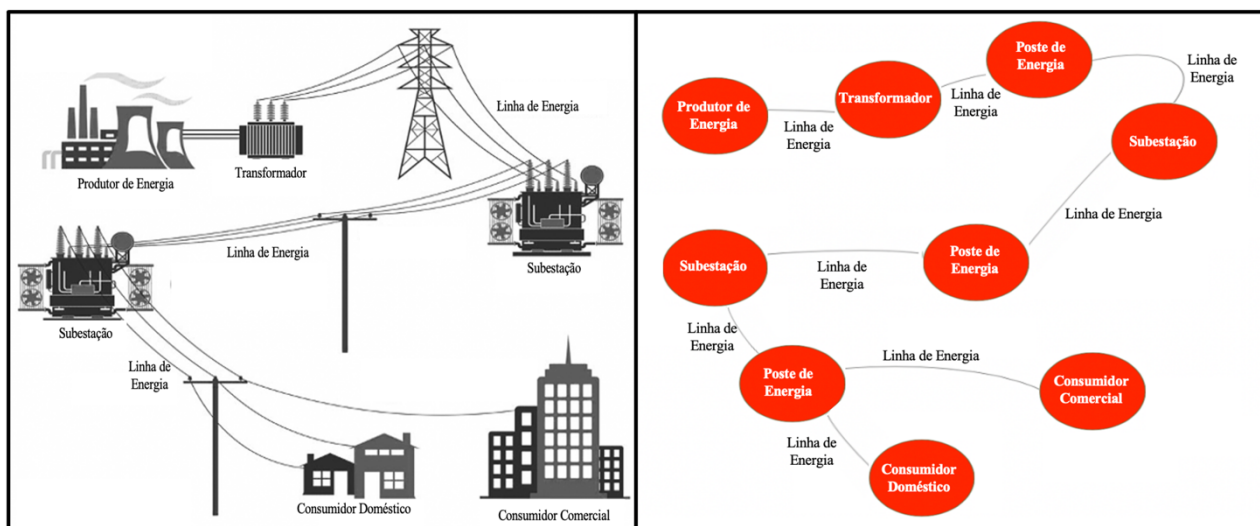


Figura 4 - Grafo Hipotético da Rede Elétrica

A estrutura da rede de energia elétrica que consiste no conjunto de ativos linhas de transmissão e cabos a serem representados como arestas e transformadores, geradores e outros ativos a serem representados como nós é bastante usual e pode ser encontrada nos estudos elaborados por Correa & Yusta (2013), Crucitti et al. (2004) e Panigrahi (2013). Além deste tipo de representação das redes elétricas, os grafos podem também ser utilizados para representar outros componentes elétricos. Tosić (2009) utilizou os grafos para representar os circuitos elétricos e as suas características. Neste caso, os vértices representavam pontos terminais ou pontos onde convergem pelo menos três condutores e as arestas representavam os condutores ou as ligações.

Com a representação da rede elétrica no formato de um grafo é possível desenvolver ferramentas para solucionar e antecipar possíveis problemas nas redes elétricas. As propriedades e os conhecimentos proporcionados pela teoria dos grafos podem ser utilizados no cálculo de circuitos, na construção e análise das topologias eletrônicas de energia e na resolução de problemas relacionados com as redes de distribuição (Xie et al., 2019). Por exemplo, os autores Correia & Yusta (2013) propuseram uma nova metodologia, baseada na teoria dos grafos, para avaliar a vulnerabilidade das redes de energia elétrica e os autores Chen et al. (2007) utilizaram um conjunto de parâmetros e o algoritmo do caminho mais curto para estudar a rede elétrica e identificarem possíveis linhas críticas.

Além destas aplicabilidades, a estruturação da rede elétrica neste formato pode ser também bastante útil para prevenir e antecipar possíveis ataques e falhas na rede. De modo a estudar a vulnerabilidade da rede, Albert et al. (2004) utilizaram a topologia da rede para determinar a capacidade de transferir energia entre geradores e consumidores quando certos nós são interrompidos e os autores Rosas-Casals et al. (2007) estudaram a tolerância da rede a erros e ataques tendo em conta a relação entre a exclusão dos nós e a conectividade global da rede.



### 3. MODELO CONCEPTUAL

#### 3.1 Modelo Conceptual para a Modelação do Grafo

De forma a construir um grafo que simule a topologia da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão de Portugal existem vários pressupostos e conceitos que têm de ser *a priori* definidos. Assim sendo, é necessário definir quais os ativos da rede que vão ser mapeados como vértices e arestas, como vão ser definidas as relações entre ativos na rede e que tipo de características podem estar associadas aos ativos. O diagrama de classes, ilustrado na figura 5, indica um modelo conceptual para a topologia da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão no formato de arestas e nós.

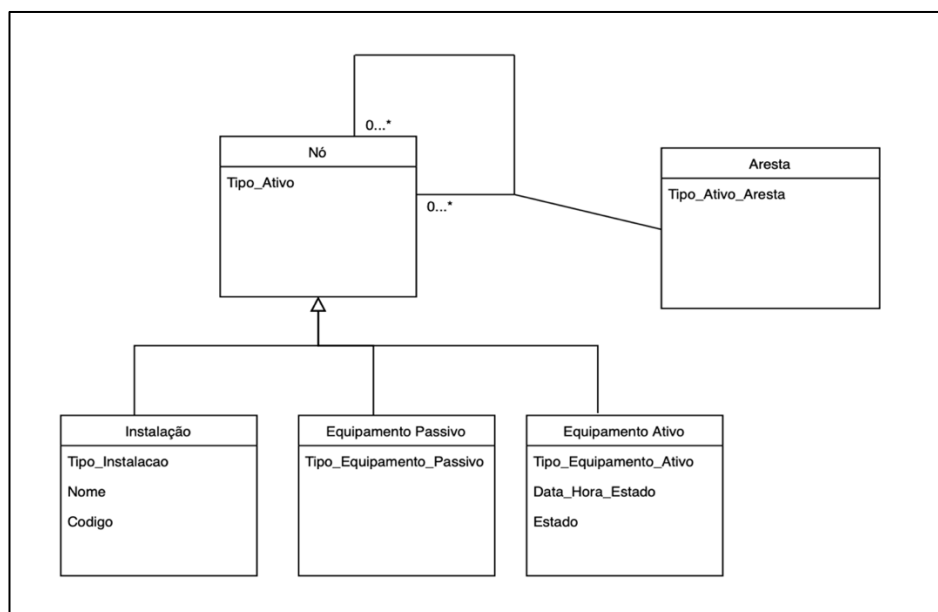


Figura 5 - Diagrama de Classes - Modelo Conceptual

O grafo vai ser constituído por dois tipos de elementos: os nós e as arestas. Os nós vão representar os diversos ativos pertencentes à rede de distribuição de AT/MT. De acordo com a estrutura da RND, foi estipulado que o nó poderia enquadrar num dos seguintes grupos de ativos: instalação, equipamento passivo ou equipamento ativo. A diferença entre estes tipos de ativos encontra-se na sua dimensão e funcionalidade. Por norma, as instalações são ativos de grande escala podendo corresponder a diversos tipos de instalações: Subestações, Produtores Centrais, PTD, Postos de Seccionamento Corte, entre outros. Cada instalação vai ser caracterizada por um nome e um código. O nó pode também corresponder a um equipamento passivo ou um equipamento ativo. A principal distinção entre estes ativos é que um equipamento ativo é caracterizado por possuir um estado que evidencia se o equipamento está fechado (em exploração) ou aberto (desligado). Os ativos que são

caracterizados por possuírem esta possível mudança de estado estão na sua maioria relacionados com funções de corte da rede que permitem isolar troços de rede ou interromper um circuito de rede. Ambos os equipamentos vão possuir uma característica que evidência qual o tipo de equipamento específico associado ao nó destes dois grupos de equipamentos e os equipamentos ativos possuem uma propriedade que indica a data e hora em que o registo do estado ocorreu.

As arestas descrevem a relação entre os ativos na rede de distribuição. Cada aresta vai ser constituída por dois nós diferentes evidenciando assim, uma conexão entre esses dois ativos na rede. Cada nó pode pertencer a mais de uma aresta e os tipos de ativos associados às arestas podem ser por exemplo, linhas de média tensão, linhas de alta tensão, cabos de ligação, entre outros.

## 4. TRABALHO EMPÍRICO

### 4.1 Base de Dados e Ferramentas Utilizadas

A construção do grafo foi realizada através dos dados provenientes da base de dados SWEG (*Smallworld Enterprise Gateway*) que é uma replicação do SITRD (Sistema de Informação Técnica da Rede de Distribuição) através de uma Base de Dados Oracle. Nesta base de dados, podem ser encontradas tabelas referentes às propriedades dos diversos ativos da rede de distribuição e tabelas que servem para guardar a informação da topologia associada à rede de distribuição (AT, MT e BT). Relativamente à informação da topologia associada à rede de distribuição de AT e MT no formato de nós e arestas, esta pode ser encontrada respetivamente em duas tabelas distintas: *Tabela\_Redde\_Nos* (utilizada para simular os nós do grafo) e *Tabela\_Redde\_Arestas* (utilizada para simular as arestas do grafo).

A construção, processamento e posterior análise do grafo foi realizada utilizando a plataforma *Azure Databricks* que é uma plataforma de análise baseada no *Apache Spark* e otimizada para a plataforma de serviços *cloud Microsoft Azure*. O *Azure Databricks* suporta várias linguagens como *Scala*, *R*, *Java*, *SQL* e *Python*, bem como inúmeras bibliotecas e arquiteturas de ciência de dados (Azure, 2020). Para a realização deste projeto, destaca-se a utilização da biblioteca *GraphFrames* que é uma biblioteca que fornece ferramentas de análise e algoritmos para grafos. Entre eles, salientam-se os algoritmos: *PageRank* (identifica vértices importantes num grafo com base em conexões), Componentes Conectados (se um grafo não tiver todo conectado, o algoritmo separa os vértices consoante as diferentes áreas conectadas) e Caminho Mais Curto (caminho mais curto entre dois vértices) (Databricks, 2020). Ao longo do projeto foi também utilizado o programa *Gephi*, que é um software gratuito para a realização de análise e visualização de redes e grafos (Bastian et al., 2009).

#### 4.2 Modelo Conceptual VS Trabalho Empírico

No modelo conceptual realizado para a construção do grafo definiu -se que os ativos da topológica da rede elétrica AT/MT poderiam ser representados por nós e arestas. No entanto, tal pressuposto não se verificou. No modelo conceptual foi definido que a tabela dos nós descreveria os vértices do nosso grafo e que os mesmos poderiam ser instalações, equipamentos passivos ou equipamentos ativos e que a tabela das arestas descreveria as ligações entre esses ativos e que representava por isso, ativos como cabos de ligação ou linhas de média ou alta tensão. Contudo, nas duas tabelas utilizadas a informação não se encontra disposta nestes parâmetros. A tabela dos nós (Tabela\_Redde\_Nos) não vai identificar nenhum ativo e não vai conter nenhuma informação relevante. A mesma apenas identifica o id dos diferentes vértices presentes na tabela das arestas. A tabela das arestas (Tabela\_Redde\_Arestas) vai conter toda a informação relevante do grafo. Todos os ativos presentes na rede de distribuição vão ser representados por arestas.

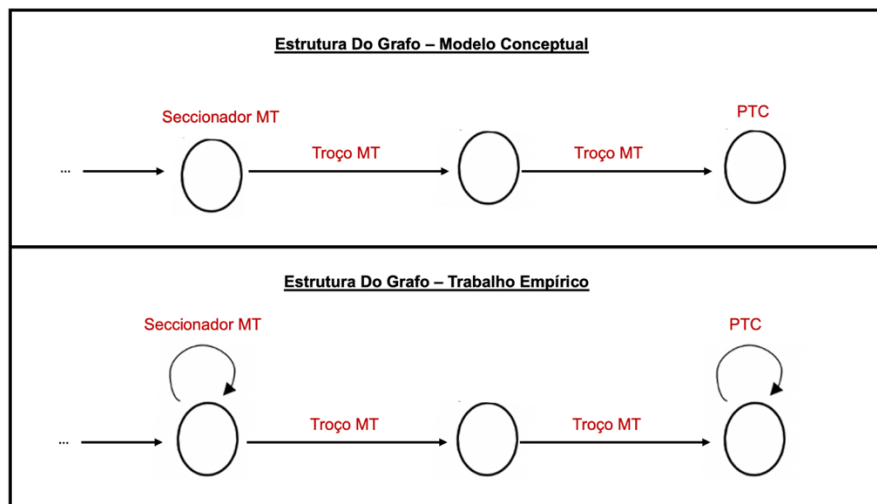


Figura 6 - Comparação da Estrutura do Grafo – Modelo Conceptual VS Trabalho Empírico

#### 4.3 Construção do Grafo

De modo a desenvolver e construir um modelo de dados que simule sob a forma de um grafo a topologia estática e dinâmica da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão, foi necessário a construção de três versões diferentes do Grafo. Cada nova versão do grafo foi produzida para ultrapassar limitações e desafios detetados na versão anterior.

##### 4.3.1 Construção do Grafo - Versão I

Para a construção do grafo – versão I apenas foram utilizadas as tabelas que descrevem a topologia da rede sob o formato de nós e arestas. O grafo vai assim ser modelado pela Tabela\_Redde\_Nos

(utilizada para modelar os nós do grafo) e a Tabela\_Rede\_Arestas (utilizada para modelar as arestas do grafo).

#### *4.3.1.1 Estrutura do Grafo*

##### *4.3.1.1.1 Tabela dos Nós*

A Tabela\_Rede\_Nos é constituída apenas pelo no\_id (número único que identifica o nó) e serve para simular todos os nós presentes no grafo. Tal como referido anteriormente, esta tabela não identifica os ativos da rede nem possui qualquer informação relevante sob os mesmos. A Tabela\_Rede\_Nos vai identificar cerca de 25 milhões de nós.

##### *4.3.1.1.2 Tabela das Arestas*

A Tabela\_Rede\_Arestas é utilizada para simular as arestas do nosso grafo. A tabela vai ter 5 atributos distintos: aresta\_id (número único que identifica a aresta), ativo\_id (número único que identifica o id do ativo associado à aresta), tipo\_ativo (identifica o tipo de ativo associado à aresta), src\_no\_id (id do nó inicial da aresta) e dst\_no\_id (id do nó final da aresta). Por norma, todos estes atributos não podem ter valor *null*. Todos os ids que aparecem nos atributos src\_no\_id e dst\_no\_id devem corresponder a um no\_id na Tabela\_Rede\_Nos e cada aresta vai ter uma direção específica determinada pelo src\_no\_id e dst\_no\_id. A Tabela\_Rede\_Arestas tem cerca de 27 milhões de arestas

#### *4.3.1.2 Características do Grafo*

##### *4.3.1.2.1 Atributo Tipo\_Ativo*

O atributo tipo\_ativo indica o tipo de ativo que está associado a uma determinada aresta. Na Tabela\_Rede\_Arestas podem ser identificados 120 tipo\_ativo distintos que podem ser agrupados em 49 tipos de ativos. Um ativo pode estar associado a mais do que um tipo\_ativo. Por exemplo, o ativo troço de média tensão pode estar associado a diversas tensões e por essa razão pode ter como tipo\_ativo TROCO\_MT\_10KV, TROCO\_MT\_15KV, TROCO\_MT\_30KV, TROCO\_MT\_60KV, entre outros. Da lista dos 49 tipos de ativos que podem ser identificados pelo atributo tipo\_ativo fazem parte os ativos: Barramento, Cabo Ligação, Contador, Disjuntor, Equipamento Corte, Gerador, PTC, Seccionador, Transformador e Troço de Média Tendão.

#### 4.3.1.2.2 Tipos de arestas

Todos os ativos mencionados anteriormente podem enquadrar-se em dois tipos de arestas: arestas *self-loop* e arestas que estabelecem uma ligação entre dois nós distintos. As arestas *self-loop* são arestas que conectam um vértice a ele mesmo e que por isso, possuem o mesmo `src_no_id` e `dst_no_id`. Os ativos que podemos encontrar neste tipo de arestas são por exemplo o disjuntor, entrada e saída, equipamento corte, gerador, PTC, seccionador, entre outros. As arestas que estabelecem uma ligação entre dois nós distintos são caracterizadas por terem um `src_no_id` diferente do `dst_no_id`. Os ativos que podem ser encontrados neste tipo de arestas são por exemplo, os troços de média tensão, os cabos de ligação, entre outros.

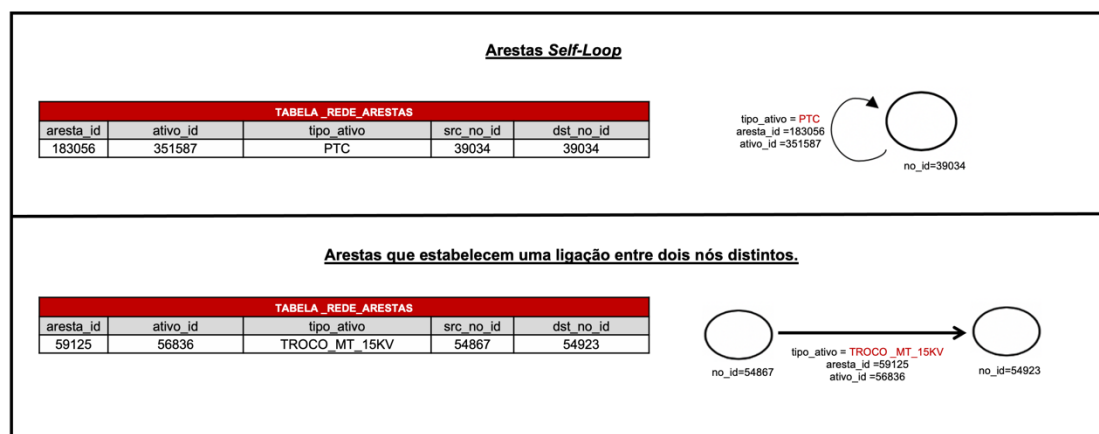


Figura 7 - Comparação entre arestas *self-loop* e das arestas que estabelecem uma ligação entre dois nós distintos

#### 4.3.1.2.3 Ativos representados por duas arestas *Self-Loop* distintas

No grafo é possível encontrar ativos que vão ser representados por duas arestas *self-loop* distintas, mas que, no entanto, dizem respeito ao mesmo ativo. A forma de identificar estes ativos é através dos atributos `tipo_ativo` e `ativo_id`. Se as arestas tiverem atributos `tipo_ativo` complementares e o mesmo `ativo_id`, então as arestas identificam o mesmo ativo. Os `tipo_ativo` complementares são caracterizados por terem o mesmo nome com a diferença que num se encontra `ponto1/pin1/ligacao_primaria` e no outro `ponto2/pin2/ligacao_secundaria`. Cerca de 23 tipos de ativos podem ser representados desta forma entre eles: seccionadores (`seccionador.ponto1` e `seccionador.ponto2`), equipamento corte (`equipamento_corte_ponto1` e `equipamento_corte_ponto2`) e transformadores (`transformador_ligacao_primario` e `transformador_ligacao_secundario`). Por norma, a representação do ativo por duas arestas distintas serve para identificar ativos que possuem mudanças de estado (passagem do estado do ativo de aberto para fechado ou vice-versa). Na

Tabela\_Rede\_Arestas não existem arestas que estabeleçam ligações entre estas duas arestas *self-loop* do mesmo ativo.

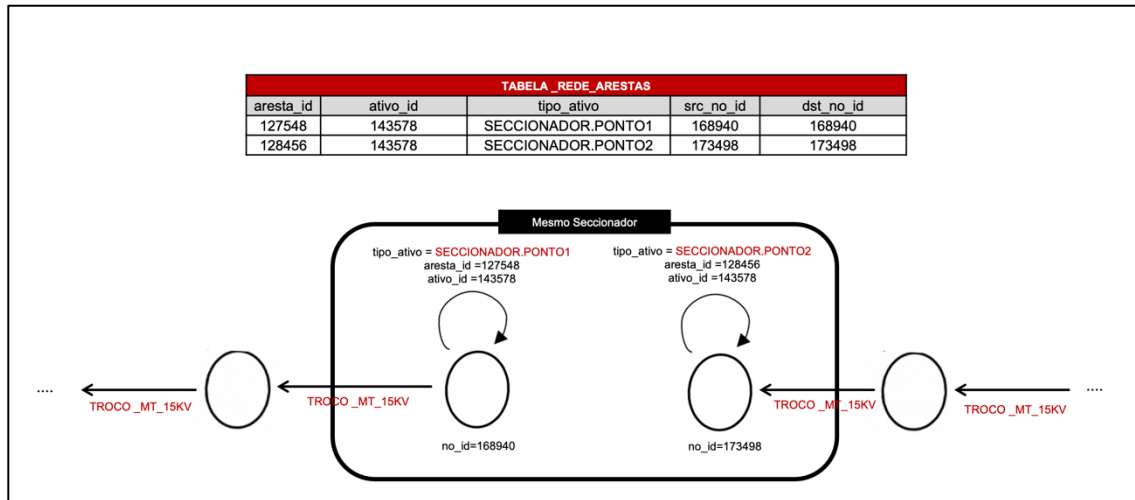


Figura 8 - Ativos representados por duas arestas *self-loop* distintas

#### 4.3.1.3 Limitações

Ao utilizar apenas as tabelas que descrevem a topologia da rede sob o formato de nós e arestas (Tabela\_Rede\_Nos e Tabela\_Rede\_Arestas) foi possível construir uma primeira versão do grafo. Neste grafo – versão I foi possível identificar cerca de 49 tipos de ativos e estabelecer relações entre os mesmos. Contudo, existem muitos requisitos que ainda não foram alcançados. Entre eles, não é possível, com a informação disponível em ambas as tabelas, identificar instalações como Produtores Centrais, Subestações, Subestações Cliente, Subestações Ren, PTD ou Postos de Seccionamento Corte e não é possível estabelecer uma hierarquia entre os ativos ou agregá-los de modo a obter apenas uma região do grafo. Além disso, o grafo não se encontra todo conectado, uma vez que não existem arestas que estabelecem as ligações entre duas arestas *self-loop* que identificam o mesmo ativo.

#### 4.3.2 Construção do Grafo - Versão II

De forma a ultrapassar todas as limitações do Grafo Versão I, foi necessário adicionar à tabela das arestas mais informações sobre os diversos ativos e fazer o processamento das arestas em falta. Para obter mais informações sobre os ativos utilizou-se cerca de 49 tabelas da base de dados SWEG referentes às propriedades dos diversos ativos da rede de distribuição. O grafo – versão II vai continuar a ser modelado pela tabela original Tabela\_Rede\_Nos e por uma nova versão da Tabela

Tabela\_Rede\_Arestas resultante da junção da tabela original Tabela\_Rede\_Arestas com as tabelas referentes às propriedades dos ativos e da junção das novas arestas criadas. A nova versão da Tabela\_Rede\_Arestas vai ser denominada Tabela\_Rede\_Arestas II.

#### *4.3.2.1 Montagem da Tabela Rede Arestas II*

##### *4.3.2.1.1 Novos Atributos*

Para cada um dos 49 tipos de ativos identificados pelo atributo `tipo_ativo` vai existir no SWEG uma tabela correspondente com mais informações sobre esse ativo. Por exemplo, para os `tipo_ativo` `cabo_ligacao` ou `barramento` vai existir respectivamente, uma tabela `cabo ligação` e uma tabela `barramento`. O `ativo_id` da tabela das arestas vai ser o `id` na tabela do ativo. Posto isto, realizou-se um *join* entre cada uma das 49 tabelas dos ativos e todas as arestas presentes na tabela das arestas. Cada *join* foi realizado entre o agrupamento das arestas com o mesmo `tipo_ativo` e a tabela correspondente ao ativo utilizando como chave o `ativo_id` da tabela das arestas e o `id` da tabela do ativo.

A Tabela\_Rede\_Arestas II vai possuir assim 15 atributos: `aresta_id`, `ativo_id`, `tipo_aresta`, `src_no_id`, `dst_no_id`, `circuito_id`, `produtor_central_id`, `subestacao_ren_id`, `subestação_id`, `subestacao_cliente_id`, `ptd_id`, `posto_secci_corte_id`, `posto_secci_corte_atmt_id`, `linha_mt_id` e `linha_mt_cod`. Os 5 primeiros atributos têm como fonte a Tabela\_Rede\_Arestas original e os restantes 10 atributos provêm das diversas tabelas dos ativos.

##### *4.3.2.1.2 Novas Arestas*

##### *4.3.2.1.2.1 Processamento das arestas LIGACAO*

Tal como referido anteriormente não existem arestas que estabeleçam a ligação entre os ativos representados por duas arestas *self-loop* distintas. Neste prisma, é necessário proceder à criação destas arestas. Todas as arestas criadas vão estabelecer a conexão entre o `ponto1/pin1/ligacao_primaria` do ativo e o `ponto2/pin2/ligacao_secundaria` do ativo e vão seguir os seguintes pressupostos: as arestas vão ter 14 atributos sendo que `tipo_ativo` vai ser igual a `LIGACAO`. A `aresta_id` vai ser igual a *null* de forma a identificar que a aresta não pertence ao conjunto original dos dados e o `src_no_id` vai corresponder ao `src_no_id` do `ponto1/pin1/ligacao_primaria` e o `dst_no_id` vai corresponder ao `dst_no_id` do `ponto2/pin2/ligacao_secundaria` ou vice-versa. Todas as restantes variáveis desta nova aresta vão ser iguais às variáveis do ativo `ponto1/pin1/ligacao_primaria`. Neste caso, é indiferente escolher se essas variáveis são iguais às do ativo `ponto1/pin1/ligacao_primaria` ou do ativo



ponto2/pin2/ligacao\_secundaria, uma vez que o conteúdo das variáveis é o mesmo em ambas as arestas do ativo. As novas arestas vão ser processadas em ambos os sentidos.

O processamento das arestas foi realizado com a condição de que a aresta criada tem de ser estabelecida entre arestas com o mesmo ativo\_id de atributos tipo\_aresta complementares. Foram processadas cerca de 2,1 milhões de arestas LIGACAO que estabelecem a ligação entre os ativos representados por duas arestas *self-loop* distintas.

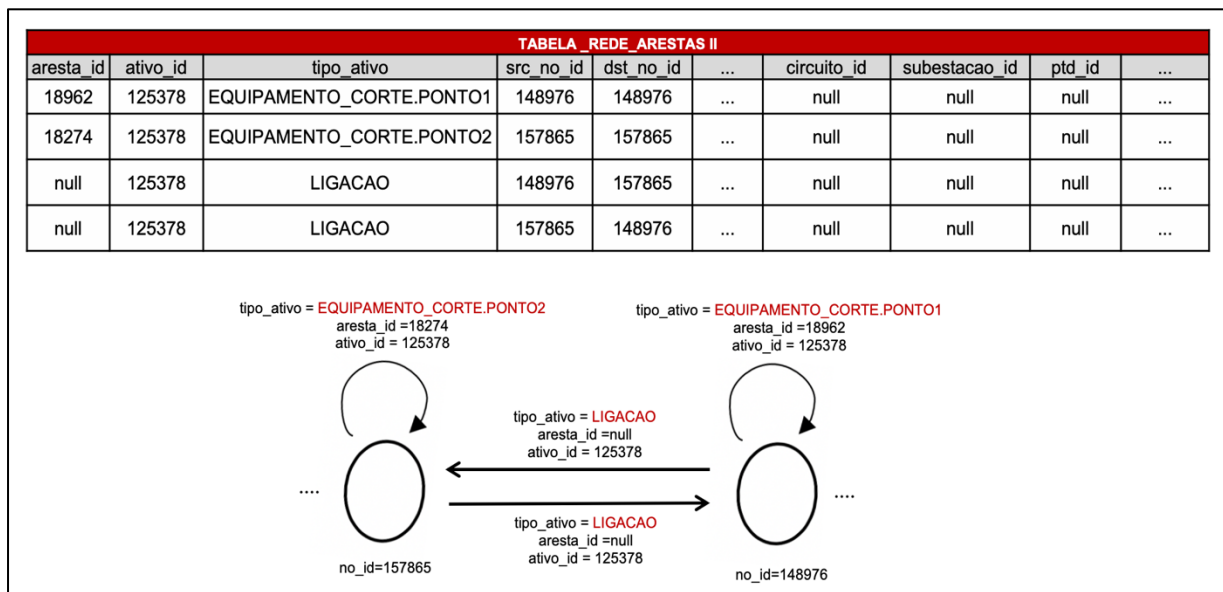


Figura 9 - Exemplo Arestas LIGACAO

#### 4.3.2.1.2.2 Processamento das arestas Troco\_MT no sentido inverso

Com a finalidade de se poder utilizar algoritmos associados à teoria dos grafos como o caminho mais curto é necessário que todas as arestas do grafo se encontrem na mesma direção. Apesar de as arestas do grafo terem direção, nem sempre um conjunto de arestas interligado se encontra no mesmo sentido. Assim sendo, de forma a garantir que os troços MT existem no mesmo sentido foi necessário fazer o processamento dos troços MT originais no sentido inverso.

O processamento das arestas trocos\_MT no sentido inverso foi realizado com os seguintes pressupostos: as arestas criadas têm todos os atributos iguais ao troco\_mt original com a única diferença que estão no sentido inverso, ou seja, o src\_no\_id da aresta troco\_MT original vai ser o dst\_no\_id da aresta troco\_MT criada e o dst\_no\_id da aresta troco\_MT original vai ser o src\_no\_id da aresta troco\_MT criada. De forma a distinguir entre a aresta troco\_MT original e aresta troco\_MT

criada, a aresta troco\_MT criada vai ter o atributo aresta\_id igual a *null*. Foram processadas cerca de 322 mil arestas deste tipo.

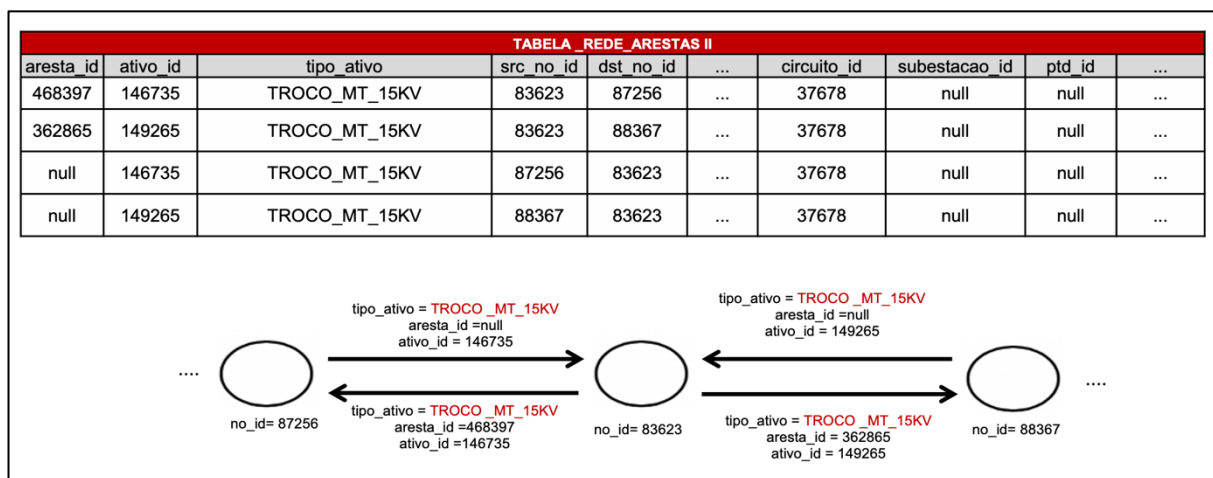


Figura 10 - Exemplo Arestas Troco\_MT

#### 4.3.2.2 Estrutura do Grafo

##### 4.3.2.2.1 Tabela dos Nós

Para simular os nós do grafo vai-se continuar a utilizar a Tabela\_Rede\_Nos utilizada no grafo versão I. Todas as propriedades desta tabela podem ser encontradas no ponto 4.3.1.1.1.

##### 4.3.2.2.2 Tabela das Arestas

A Tabela\_Rede\_Arestas II vai ser utilizada para simular as arestas do nosso grafo. Esta tabela vai ter 15 atributos: aresta\_id (número único que identifica a aresta), ativo\_id (número único que identifica o id do ativo associado à aresta), tipo\_ativo (identifica o tipo de ativo associado à aresta), src\_no\_id (id do nó inicial da aresta), dst\_no\_id (id do nó final da aresta), circuito\_id (circuito associado ao ativo), produtor\_central\_id (id do produtor central a que o ativo está associado), subestacao\_ren\_id (id da subestação ren a que o ativo está associado), subestacao\_id (id da subestação a que o ativo está associado), subestacao\_cliente\_id (id da subestação cliente a que o ativo está associado), ptd\_id (id do ptd a que o ativo está associado), posto\_secci\_corte\_id (id do posto de seccionamento corte a que o ativo está associado), posto\_secci\_corte\_atmt\_id (id do posto de seccionamento corte AT/MT a que o ativo está associado), linha\_mt\_id (id da linha MT); linha\_mt\_cod (código da linha MT). Os atributos ativo\_id, tipo\_ativo, src\_no\_id e dst\_no\_id não podem ter valor *null*. Todos os outros restantes atributos podem ter valor *null*. Se a aresta\_id de uma

determinada aresta for *null* isso significa que essa aresta foi criada e que não pertence ao conjunto original dos dados. Se qualquer outro atributo for *null* isso significa que o ativo representado pela aresta não possui aquela característica. A Tabela\_Rede\_Arestas II vai ser constituída por cerca de 29,2 milhões de arestas. Todas as características do grafo mencionadas no ponto 4.3.1.2 são válidas para este grafo com exceção da premissa: não existem arestas que estabeleçam ligações entre estas duas arestas *self-loop* do mesmo ativo.

#### 4.3.2.3 Características do Grafo

Com a nova configuração da Tabela\_Rede\_Arestas II é possível inferir novos ativos e novas características associadas ao grafo.

##### 4.3.2.3.1 Identificação dos ativos instalações

Através dos atributos `produtor_central_id`, `subestacao_ren_id`, `subestacao_id`, `subestacao_cliente_id`, `ptd_id`, `posto_secci_corte_id` e `posto_secci_corte_atmt_id` é possível identificar respetivamente os seguintes ativos instalações: Produtor Central, Subestação Ren, Subestação, Subestação Cliente, PTD, Posto de Seccionamento Corte e Posto de Seccionamento Corte AT/MT. Como estes ativos são identificados por atributos e não por uma aresta, a representação dos mesmos não vai coincidir com a representação dos ativos em arestas. Isto significa que estes ativos não vão ser representados por apenas uma aresta, mas sim por um conjunto de arestas.

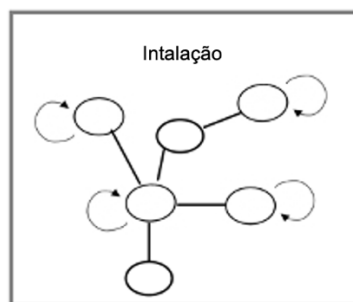


Figura 11 - Conjunto de arestas que representa uma instalação

#### 4.3.2.3.2 Esquema interno e Esquema Externo

##### 4.3.2.3.2.1 Definição

Todas as arestas podem assim pertencer a dois esquemas: Esquema Externo e Esquema Interno. O esquema interno refere-se à representação topológica de todos as arestas que pertencem a um determinado ativo instalação e o esquema externo refere-se à representação topológica de todas as arestas que não pertencem a um determinado ativo instalação. O esquema interno vai ser assim, o conjunto de todas as arestas associadas a um determinado ativo instalação. Se uma aresta fizer parte de um ativo instalação, então ela faz automaticamente parte do seu esquema interno. De forma, a identificarmos se a aresta faz parte do esquema interno de um ativo instalação é necessário que um dos seus atributos `produtor_central_id`, `subestacao_ren_id`, `subestacao_id`, `subestacao_cliente_id`, `ptd_id`, `posto_secci_corte_id` e `posto_secci_corte_atmt_id` não seja *null*. Por exemplo, se tivermos uma aresta cabo ligação com a `subestacao_id` igual a x isso significa que o ativo cabo ligação pertence ao esquema interno da subestação x. A mesma lógica é utilizada para as restantes instalações e não é possível uma aresta pertencer a mais do que um esquema interno, ou seja, se um dos atributos mencionados não for *null*, todos os restantes têm de o ser. Para uma aresta pertencer ao esquema externo, ela tem de ter todos os atributos `produtor_central_id`, `subestacao_ren_id`, `subestacao_id`, `subestacao_cliente_id`, `ptd_id`, `posto_secci_corte_id` e `posto_secci_corte_atmt_id` *null*.

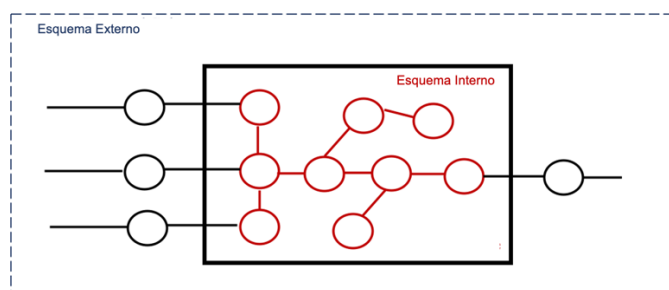


Figura 12 - Diferenciação entre esquema interno e esquema externo

##### 4.3.2.3.2.2 Arestas que fazem a ligação entre o esquema interno e externo

A ligação entre o esquema interno de um determinado ativo instalação e o esquema externo da rede é sempre realizado através das arestas hypernodes. Estas arestas são caracterizadas por serem arestas *self-loop* onde o `tipo_ativo` é igual a `HYPERNODE.PIN2` ou `HYPERNODE.PIN1`. Os hypernodes não vão ser ativos da rede, mais sim os elementos que estabelecem a ligação entre o esquema interno e esquema externo. O `HYPERNODE.PIN2` faz a conexão com o esquema interno de um determinado ativo instalação e o `HYPERNODE.PIN1` faz a conexão com o esquema externo da rede.

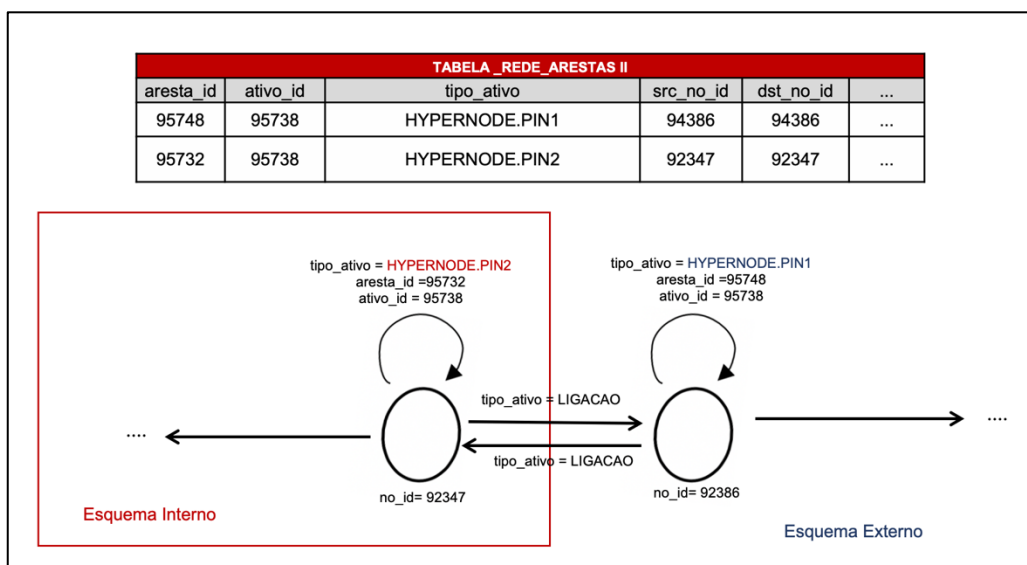


Figura 13 - Representação do Hypernode

#### 4.3.2.4 Limitações

Ao acrescentar mais informações sobre os ativos nas arestas e ao adicionar as novas arestas criadas, o grafo versão II deveria conter todos os ativos e conexões que simulam a estrutura topológica completa da Rede Elétrica de Distribuição AT / MT. Com a Tabela\_Rede\_Arestas II já é possível identificar os ativos instalações, estabelecer uma hierarquia entre ativos ou identificar quando um ativo faz parte do esquema externo ou esquema interno. No entanto, verificou-se que o grafo continua a não estar todo conectado. Ao realizar-se o esquema interno para vários ativos instalações, verificou-se que nem sempre todas as arestas pertencentes a uma determinada instalação estavam conectadas. Além disso, ao realizar-se comparações entre o grafo do esquema interno de uma instalação e o seu esquemático averiguou-se a falta de determinados ativos. Esta lacuna deve-se ao facto de a replicação do SITRD para uma base de dados relacional ainda se encontrar em desenvolvimento e por isso, determinados ativos ainda não estão mapeados na Tabela\_Rede\_Arestas no formato de nós e arestas.

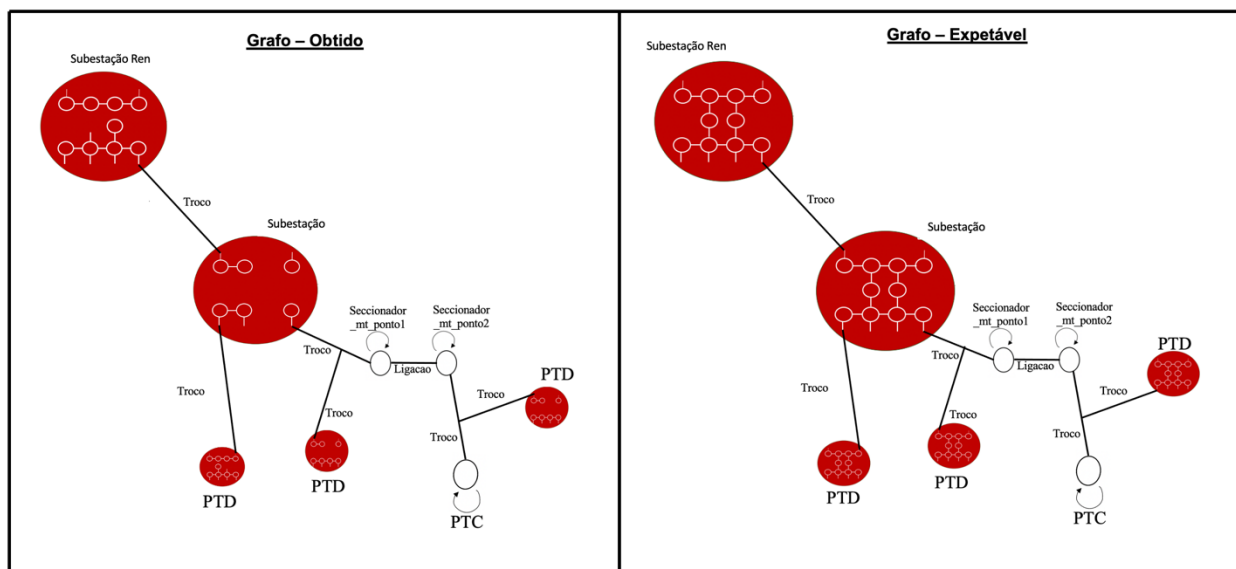


Figura 14 - Comparação do Grafo-Obtido VS Grafo-Expetável

### 4.3.3 Construção do Grafo - Versão III

Com vista a ultrapassar o problema de o grafo não se encontrar todo interligado, foi necessário proceder a uma nova modificação da Tabela\_Rede\_Arestas II utilizada para modelar o grafo versão II. Esta nova modificação tem como base a eliminação de parte das arestas pertencentes ao esquema interno das instalações e a construção de dois novos esquemas internos padrão onde não seja possível encontrar arestas soltas. Todas as arestas e ativos pertencentes ao esquema externo da rede permaneceram inalteradas.

#### 4.3.3.1 Montagem Tabela\_Rede\_Arestas III

##### 4.3.3.1.1 Construção do Esquema Interno I

O esquema interno padrão I é utilizado para definir a estrutura de todos os esquemas internos das instalações: subestações. A construção do esquema interno padrão I tem como base os seguintes pressupostos: do esquema interno original das subestações apenas se vão manter as arestas originais que definem os ativos: entradas\_saida e os transformadores, seccionadores e disjuntores que podem ser associados às entradas saídas das subestações. Todas as restantes arestas associadas ao esquema interno das subestações serão eliminadas com exceção das arestas do tipo ligacao que fazem a

correspondência entre o transformador\_ligacao\_primaria e transformador\_ligacao\_secundario, seccionador.ponto1 e seccionador.ponto2 e disjuntor.ponto1 e disjuntor.ponto2.

Com base na topologia das subestações, foram criadas arestas que estabelecem a ligação entre as arestas *self-loop* que definem os seguintes ativos: entrada\_saida e transformador\_ligacao\_primaria, transformador\_ligacao\_secundario e seccionador.ponto1, seccionador.ponto2 e disjuntor.ponto1 e disjuntor.ponto2 e entrada\_saida.

Para a criação destas arestas ser realizada, o conjunto das duas arestas *self-loop* tem de ter a mesma subestacao\_id e o mesmo circuito\_id. Todas as arestas criadas vão ter o tipo\_ativo igual a LIGACAO.SUBESTACAO, a aresta\_id e o ativo\_id vão ser *null* e vão ser criadas arestas em ambas as direções. Foram processadas cerca de 11 mil arestas LIGACAO.SUBESTACAO.

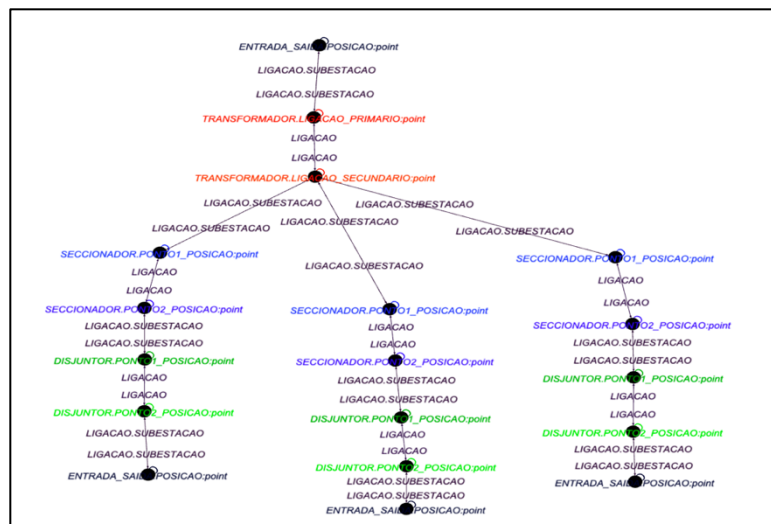


Figura 15 - Esquema Interno I

#### 4.3.3.1.2 Construção do Esquema Interno II

O esquema interno padrão II é utilizado para definir a estrutura de todos os esquemas internos das instalações: Produtor Central, Subestação Ren, Subestação Cliente, PTD, Posto de Seccionamento Corte e Posto de Seccionamento Corte AT/MT. Neste caso, as únicas arestas do esquema interno original que se vão manter são as arestas que vão definir o ativo entrada\_saida. Todas as restantes arestas associadas ao esquema interno original destas instalações serão eliminadas. Neste caso, apenas se selecionou o ativo entrada\_saida porque existem vários ativos que ainda não se encontram mapeados no esquema interno dessas instalações e porque não era perceptível associar de forma automatizada outros ativos às entradas e saídas. Assim sendo, para a realização do esquema interno

padrão II apenas se estabeleceram ligações em ambos os sentidos entre as diversas entradas e saídas das instalações. O processamento dessas ligações foi realizado através do agrupamento das arestas do tipo entradas\_saídas por tipo de instalação e por id de instalação. A aresta\_id e o ativo\_id das arestas criadas vai ser *null* e o atributo tipo\_id vai depender do tipo de instalação. O tipo\_id pode ser LIGACAO.SUBESTACAO\_CLIENTE, LIGACAO.PTD, LIGACAO.POSTO\_SECCI\_CORTE, LIGACAO.SUBESTACAO\_REN, LIGACAO.PRODUTOR\_CENTRAL, LIGACAO.PSC\_ATMT.

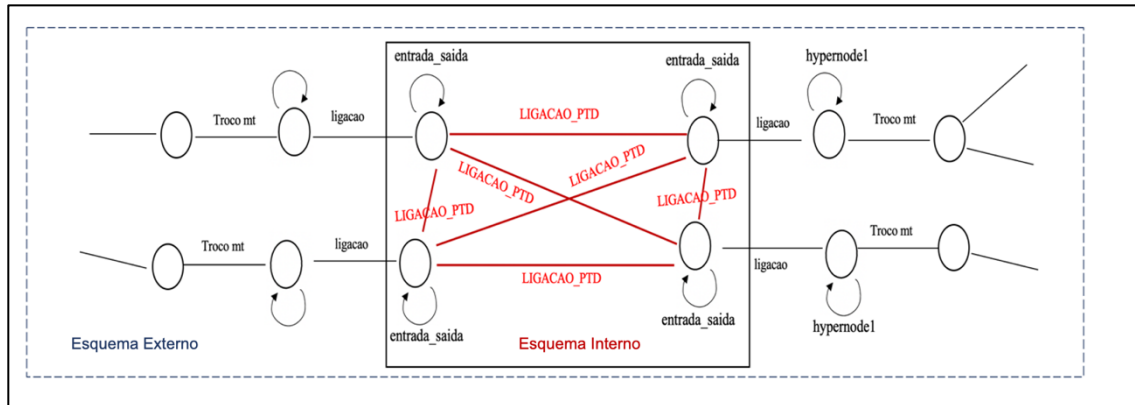


Figura 16 - Exemplo do Esquema Interno II para um PTD

#### 4.3.3.2 Estrutura do Grafo

O grafo versão III vai ser modelado pela Tabela\_Rede\_Nos II (utilizada para definir os nós do grafo) e pela Tabela\_Rede\_Arestas III (utilizada para definir as arestas do grafo).

##### 4.3.3.2.1 Tabela dos Nós

A Tabela\_Rede\_Nos II é uma tabela reduzida da Tabela\_Rede\_Nos. Esta tabela tem apenas os nós das arestas que se encontram na Tabela\_Rede\_Arestas III. Todas as propriedades desta tabela continuam iguais às características descritas ponto 4.3.1.1.1.

##### 4.3.3.2.2 Tabela das Arestas

A Tabela\_Rede\_Arestas III vai ser utilizada para simular as arestas do nosso grafo. A mesma vai continuar a ser constituída pelos 15 atributos e pela maioria das propriedades mencionadas no ponto 4.3.2.3. Neste caso, apenas os atributos ativo\_id, src\_no\_id e dst\_no\_id não podem ter valor *null*. Devido à elaboração dos novos esquemas internos, o número de arestas vai diminuir exponencialmente para cerca de 1,67 milhões de arestas.



#### 4.3.3.3 Limitações

A construção dos novos esquemas internos das instalações vieram permitir a conexão entre qualquer parte do grafo. Apesar de todas as metas da construção do grafo terem sido alcançadas, as mudanças nos esquemas internos das instalações podem pôr em causa o futuro desenvolvimento de certos *use cases*, uma vez que o esquema interno construído não detém todos os ativos dos esquemas internos originais.

#### 4.4 Comparação dos Grafos Construídos

Dos três grafos realizados, o grafo versão I é o grafo cuja construção não permite alcançar o maior número de requisitos secundários. Apenas utilizando as tabelas originais e sem fazer nenhuma manipulação de dados não é possível identificar as instalações, estabelecer uma hierarquia entre os ativos ou agregá-los de modo a obter apenas uma porção do grafo. A construção do grafo versão II e III já permitem alcançar todas estas metas. As principais diferenças entre estes dois grafos encontram-se na existência ou não dos esquemas internos originais das instalações e na interligação completa ou incompleta de todos os nós do grafo.

Face aos *use cases* secundários que se pretendem desenvolver, atribui-se um maior peso à interligação do grafo do que à presença do esquema interna original das instalações. Por esta razão, todos os *use cases* vão ser desenvolvidos em função do grafo versão III.

Tabela II - Comparação entre os três grafos realizados

	GRAFO – VERSÃO I	GRAFO – VERSÃO II	GRAFO – VERSÃO III
Número de Arestas	26,8 Milhões	29,2 Milhões	1,68 Milhões
Podemos identificar os ativos?	✓	✓	✓
Podemos identificar as instalações?	✗	✓	✓
Podemos identificar o esquema interno e externo?	✗	✓	✓
Podemos estabelecer uma hierarquia entre os elementos?	✗	✓	✓
É necessário criar arestas?	✓	✓	✓
Existe manipulação de dados?	✗	✓	✓
Tem o esquema interno das instalações original?	—	✓	✗
O grafo está todo conectado?	✗	✗	✓

#### *4.5 Desenvolvimento de Use-Cases a partir do Grafo Versão III*

Com a construção do grafo efetuada é possível realizar sob a topologia da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão diferentes *use cases* analíticos relevantes para a visualização, estudo e análise da rede de distribuição. Os *use cases* descritos neste capítulo vão se dividir em dois tipos: *use cases* principais e *use cases* secundários. Os *use cases* principais são caracterizados por estarem relacionados com a seleção de uma região específica do grafo versão III. Os *use cases* secundários são caracterizados por serem realizados a partir do *output* dos *use cases* principais.

##### *4.5.1 Use Case Principal – Grafo da Topologia Estática da Subestação*

###### *4.3.1.1 Definição*

O *use case* principal - Grafo da Topologia Estática da Subestação tem como objetivo selecionar todas as arestas e nós do grafo versão III que podem estar associadas à rede de distribuição elétrica de uma determinada subestação. O *input* deste *use case* vai ser o código da subestação (código único de 12 dígitos que identifica a subestação) e o *output* serão duas tabelas (tabelas das arestas e tabela dos nós) que descrevem a topologia estática da rede de distribuição para essa subestação. Nesta topologia podem ser encontradas as diversas ligações entre a subestação escolhida e as restantes instalações (subestações, subestações clientes, PTD, PTC, posto de seccionamento corte, entre outros) e todos os ativos constituintes dessas ligações.

###### *4.3.1.2 Processamento*

Para a realização deste *use case* é necessário recorrer à tabela das arestas do grafo versão III e a uma tabela complementar denominada tabela dos circuitos. A tabela dos circuitos é a tabela que nos permite estabelecer uma conexão hierárquica entre os elementos na rede e consequentemente filtrar regiões do grafo. Esta tabela foi extraída da base de dados *SWEG* e é constituída por 4 atributos: *id* (número único que identifica o circuito); *codigo* (código do ativo associado ao circuito); *tipo* (tipo de circuito) e *circuito\_pai* (*id* do circuito que se encontra no nível hierárquico superior). Por norma, todos os *ids* que aparecem no atributo *circuito\_id* da tabela das arestas têm de corresponder a um *id* na tabela dos circuitos

Relativamente ao processamento deste *use case*, o mesmo pode ser dividido em cinco fases complementares. As primeiras quatro fases dizem respeito à obtenção da tabela das arestas e a última fase diz respeito à obtenção da tabela dos nós. As primeiras quatro fases caracterizam-se respetivamente, pela obtenção dos circuitos associados à rede de distribuição da subestação; pela

obtenção de todas as arestas do tipo troco\_mt associadas aos circuitos selecionados; pela obtenção das restantes arestas associadas aos nós das arestas anteriores e pela obtenção de todas as arestas que caracterizam o esquema interno das instalações identificadas. A junção de todas as arestas obtidas nestas quatro fases complementares vai dar origem à tabela das arestas. Posteriormente, a partir da tabela das arestas é criada a tabela dos nós que possui todos os ids presentes nos atributos src\_no\_id e dst\_no\_id da tabela das arestas.

#### 4.5.1.3 Use Cases Secundários

Com o *output* principal obtido, imensos *use cases* secundários podem ser realizados a partir do Grafo da Topologia Estática da Subestação. Os *use cases* secundários realizados enquadram-se em três tipos de *use cases*: *use case* de visualização, *use cases* de listas de ativos e *use cases* de aplicações do grafo.

Através do programa *Gephi* é possível utilizar as duas tabelas obtidas (tabela dos nós e tabela das arestas) e visualizar o grafo da rede de distribuição elétrica de uma determinada subestação. As figuras 18,19,20 e 21 retratam a topologia da rede estática para a subestação A.

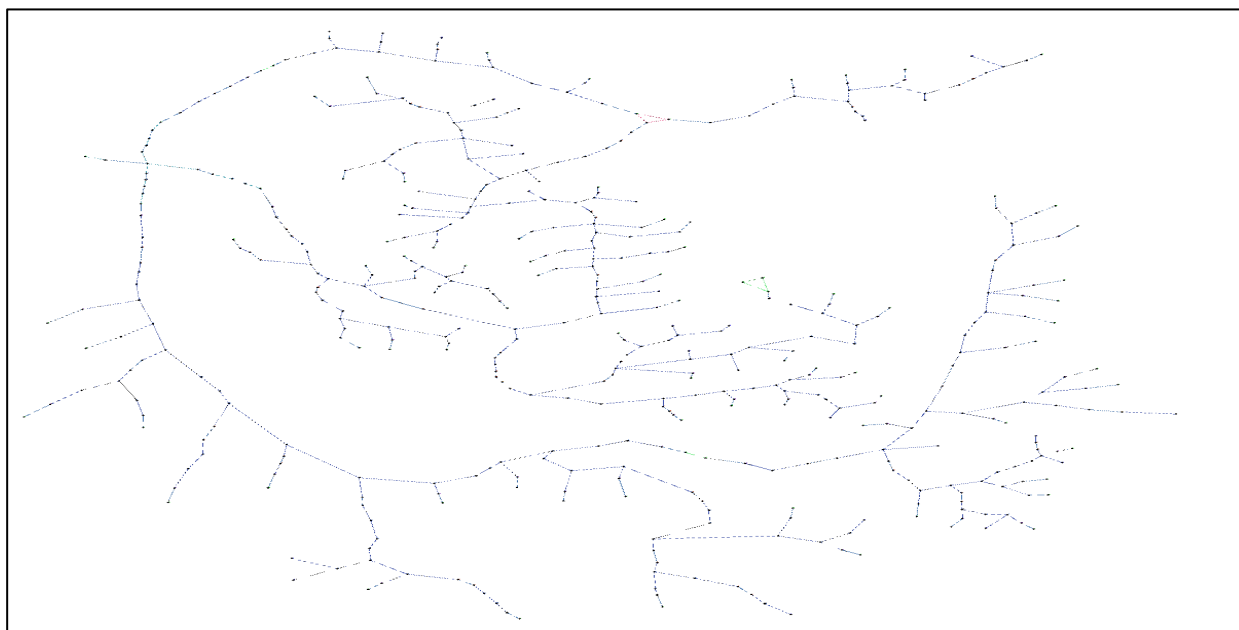


Figura 17 - Grafo da Topologia Estática da Subestação A

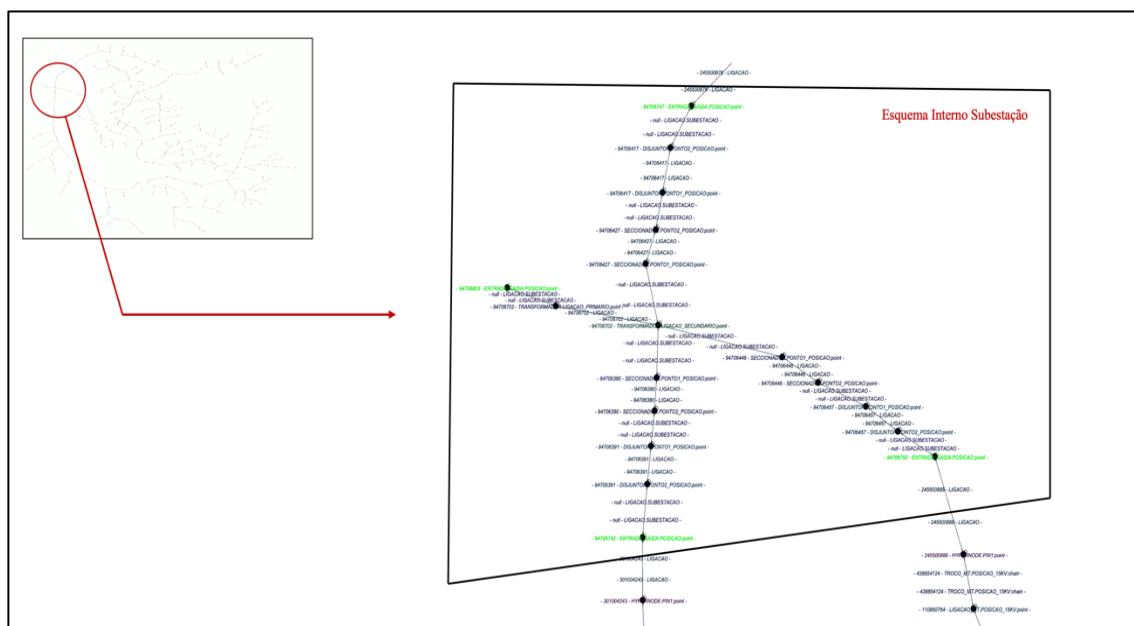


Figura 18 - Parte do Grafo da Topologia Estática da Subestação A

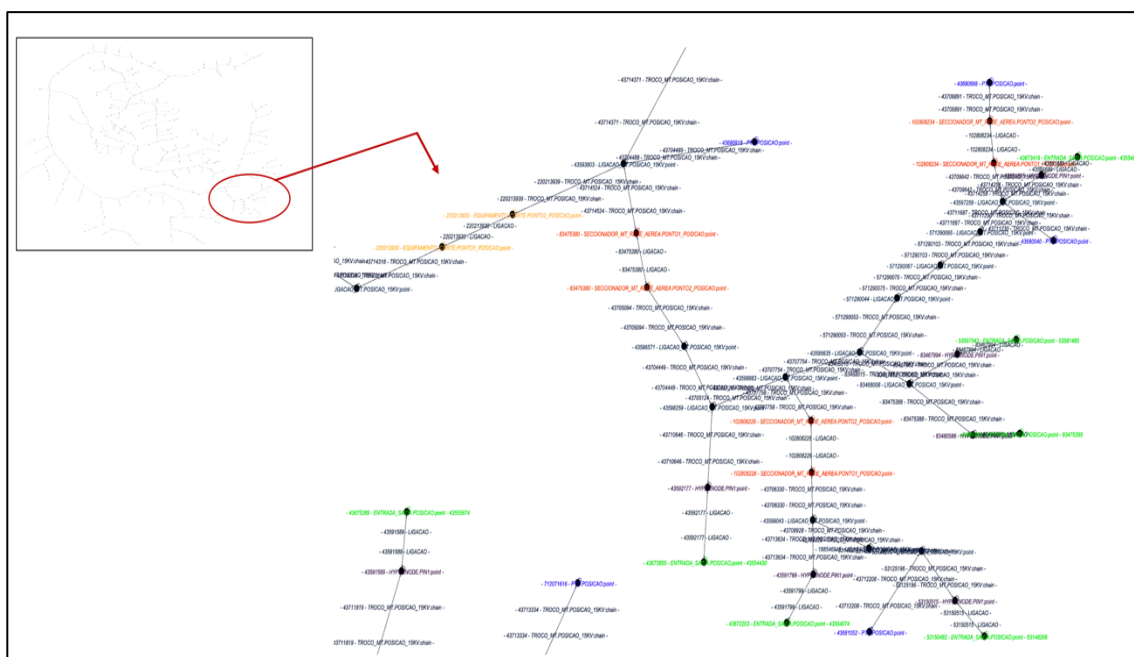


Figura 19 - Parte do Grafo da Topologia Estática da Subestação A



#### 4.5.2 Use Case Principal - Grafo da Topologia Dinâmica da Subestação

##### 4.5.2.1 Definição

O *Use Case Principal* – Grafo da Topologia Dinâmica da Subestação tem como objetivo selecionar, para um determinado período de tempo, todas as arestas e nós do grafo-versão III que estão conectadas à rede de distribuição elétrica de uma determinada subestação. O *input* deste *use case* vai ser o código da subestação (código único de 12 dígitos que identifica a subestação) e um período de tempo (data e hora). O *output* obtido serão duas tabelas (tabelas das arestas e tabela dos nós) que descrevem a topologia dinâmica da rede de distribuição da subestação.

##### 4.5.2.2 Processamento

Para a realização deste *use case* é necessário recorrer à tabela das arestas do grafo versão III e a duas tabelas complementares: tabela dos circuitos e tabela dos estados. A tabela dos estados é a tabela que permite dar dinamismo ao grafo topológico da subestação e perceber quais são os ativos que estão em funcionamento. A tabela de estados utilizada neste *use case* não é uma tabela pertencente a nenhuma base de dados real, mas sim uma tabela simulada. A tabela dos estados simulada vai ter três atributos: id (identificador do ativo); estado (representa o estado do ativo: fechado (em exploração) e aberto (desligado)) e *timesheet* (representa a data e hora a que a mudança de estado ocorreu). Todos os id presentes na tabela dizem respeito aos ids dos ativos seccionadores de média tensão que podem ser encontrados no grafo versão III. Os atributos estado e *timesheet* foram gerados de forma aleatória.

Relativamente ao processamento deste *use case*, o mesmo pode ser dividido em seis fases complementares. As primeiras cinco fases dizem respeito a obtenção da tabela das arestas e a última fase diz respeito a obtenção da tabela dos nós. Na primeira fase é obtido o grafo da topologia estática da subestação. Na segunda fase são selecionados, através da tabela dos estados, os ids dos ativos que têm estado aberto no período de tempo selecionado. Na terceira fase são eliminadas as arestas LIGACAO do grafo da topologia estática da subestação cujo ativo\_id é igual aos ids com estado aberto. Na quarta fase é aplicado ao grafo, o algoritmo dos Componentes Conectados que separa os vértices consoante as diferentes áreas conectadas. Na quinta fase, é elaborada a tabela das arestas através da seleção dos nós e das arestas associadas à região do grafo que detém as arestas associadas ao esquema interno da subestação selecionada. A partir da tabela das arestas, na fase seis é criada uma tabela dos nós que possui todos os ids presentes nos atributos src\_no\_id e dst\_no\_id da tabela das arestas.

#### 4.5.2.3 Use Cases Secundários

Todo os *use cases* descritos no ponto 4.5.1.3, podem também ser aplicados ao grafo da topologia dinâmica da subestação. A única diferença diz respeito à interpretação das listas dos PTD e PTC, uma vez que os ativos que aparecem nessas listas não são os ativos que podem estar conectados à subestação, mas sim os ativos que estão a ser alimentados naquele momento pela subestação.

## 5. AVALIAÇÃO PRELIMINAR

Com vista a realizar uma avaliação preliminar do projeto desenvolvido foi solicitado um *feedback* global à EDP INOVAÇÃO que permitisse avaliar de forma qualitativa todo o trabalho realizado. Esse *feedback* assentiu em três vertentes distintas: cumprimento dos requisitos e expetativas iniciais, pontos fortes e fracos do trabalho realizado e possíveis melhorias.

De acordo com o *feedback* obtido, os requisitos e expetativas iniciais definidas inicialmente “interpretar a informação existente no sistema de informação geográfica, montar o grafo e prepará-lo para receber informação dinâmica proveniente de outro sistema” foram cumpridos. O trabalho desenvolvido permitiu também “suportar *use cases* que necessitavam de *outputs* deste “grafo” que foi montado”.

Relativamente aos pontos fortes destaca-se “o enorme esforço de fazer sentido desta quantidade de informação massiva, e estruturá-la para se conseguir realizar a analítica pretendida”. Tal interpretação e estruturação está evidenciada no desenvolvimento das três versões do grafo realizadas para ultrapassar limitações e desafios detetados ao longo da construção do mesmo. Os pontos fracos foram “não ter sido possível validar o trabalho com o *dataset* final nem garantir a generalização dos modelos desenvolvidos”. À data da realização do projeto, a replicação do SITRD para uma base de dados relacional ainda se encontrava em desenvolvimento e por essa razão não foi possível utilizar o *dataset* final com todos os ativos mapeados da rede de distribuição AT/MT. Esta não utilização do *dataset* final levou à definição de certas suposições de carácter eléctrico e estrutura da rede que precisam de ser confirmadas de modo a garantir a generalização dos modelos desenvolvidos.

Como possíveis melhorias a desenvolver foram identificadas: a transformação destes instrumentos de analítica “em um produto que permita ter o grafo atualizado e associado a *timestamps* de modo a poder ser possível utilizar essa combinação grafo/*timestamp* em analítica” e um possível melhoramento na questão da topologia dinâmica que “tem de ser desenvolvida (numa perspetiva de ferramenta que está permanentemente a atualizar a informação) e validada com *datasets* produtivos”.



## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

Este projeto surgiu a partir da necessidade de se ter um modelo de dados que simulasse sob a forma de um grafo a topologia estática e dinâmica da rede de distribuição elétrica de alta e média tensão e, que posteriormente pudesse ser utilizado como uma camada de construção para diferentes *use cases* de analítica.

No decorrer da construção do grafo verificou-se que o modelo conceptual elaborado para a modelação do grafo não estava de acordo com a modelação da topológica da rede de distribuição de AT/MT encontrada nos dados utilizados. Esta divergência está associada ao facto de os nós não representarem os ativos da rede de distribuição. Todos os ativos encontram-se representados por arestas e por essa razão, o modelo conceptual desenvolvido tem de ser redesenhado.

As diversas montagens e manipulações de dados desenvolvidas no decorrer da criação do grafo permitiram que o principal objetivo deste projeto fosse cumprido. A tabela das arestas III e a tabela dos nós II possibilitam definir a topologia da rede de distribuição num formato de nós e arestas onde seja possível identificar os ativos da rede e as relações estabelecidas entre eles, estabelecer uma hierarquia entre os ativos ou agregá-los de modo a obter apenas uma região do grafo. As simplificações desenvolvidas nos esquemas internos das instalações permitiram ter todo o grafo interligado entre si e possibilitaram a aplicabilidade de ferramentas e algoritmos relacionados com a teoria dos grafos.

A realização deste projeto permitiu também alargar o leque de aplicabilidades de analítica a ser desenvolvido, uma vez que a topologia da rede de distribuição de alta e média tensão se encontra agora numa plataforma aberta que poderá servir de suporte para iniciativas e aplicações futuras.

### 6.2 Trabalhos Futuros

Com base na avaliação preliminar realizada, propõe-se em primeiro lugar, a aplicabilidade da metodologia desenvolvida para a construção do grafo versão II e dos *use cases* no *dataset* final produtivo que irá conter todos os elementos da rede de distribuição de AT/MT mapeados. Posteriormente, propõe-se a conectividade do grafo construído com *live data bases* que permitam responder à necessidade de ter um grafo constantemente atualizado e associado aos equipamentos ligados à rede de distribuição AT/MT num determinado momento.

Para um estudo futuro, propõe-se explorar mais pormenorizadamente as diversas ferramentas disponibilizadas na teoria dos grafos para o desenvolvimento de outros *use cases* pertinentes como o calcular do balanço energético tendo em conta a topologia da rede, a realização de análises de centralidade para distinguir a importância dos diversos ativos na rede ou a seleção de alternativas para a realimentação da rede tendo em consideração restrições elétricas relevantes. Poderia também ser uma mais valia associar ao grafo as coordenadas geográficas associadas aos ativos da rede de distribuição de AT/MT ou utilizar o modelo de construção e estruturação dos dados desenvolvido para construir o grafo referente à topologia da rede de distribuição de baixa tensão.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Akhtar, N. (2014). Social network analysis tools. *Proceedings - 2014 4th International Conference on Communication Systems and Network Technologies, CSNT 2014*, 388–392. <https://doi.org/10.1109/CSNT.2014.83>
- Albert, R., Albert, I., & Nakarado, G. L. (2004). Structural vulnerability of the North American power grid. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 69(2 2), 1–10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.025103>
- Azure, M. (2020). *Azure Databricks*. Obtido 23 de Setembro de 2020, de <https://azure.microsoft.com/pt-pt/services/databricks/>
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: An open source software for exploring and manipulating networks. BT - International AAAI Conference on Weblogs and Social. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, 361–362. <https://gephi.org/publications/gephi-bastian-feb09.pdf>
- Beineke, L. W., Wilson, R. J., & Cameron, P. J. (Eds.). (2004). *Topics in Algebraic Graph Theory*. Cambridge University Press.
- Cardoso, D. M. (2005). *Teoria dos Grafos e Aplicações* [Universidade de Aveiro]. <http://arquivoescolar.org/bitstream/arquivo-e/78/1/TGA2004.pdf>
- Chen, X., Sun, K., Cao, Y., & Wang, S. (2007). *Identification of Vulnerable Lines in Power Grid Based on Complex Network Theory*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4275499>
- Correa, G. J., & Yusta, J. M. (2013). Grid vulnerability analysis based on scale-free graphs versus power flow models. *Electric Power Systems Research*, 101, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.04.003>
- Crucitti, P., Latora, V., & Marchiori, M. (2004). A topological analysis of the Italian electric power grid. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 338(1-2 SPEC. ISS.), 92–97. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.02.029>
- Databricks. (2020). *GraphFrames user guide - Python*. Obtido 23 de Setembro de 2020, de <https://docs.databricks.com/spark/latest/graph-analysis/graphframes/user-guide-python.html>
- Easley, D., & Kleinberg, J. (2010). *Networks, Crowds and Markets: Reasoning about a Highly Connected World*. Cambridge University Press.

- EDP Distribuição. (2016). *PLANO DE DESENVOLVIMENTO E INVESTIMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO 2017 - 2021*. <https://www.edpdistribuicao.pt/sites/edd/files/2019-02/PDIRD.pdf>
- EDP Distribuição. (2018). *Manual de Ligações à rede elétrica de serviço público Guia técnico e logístico de boas práticas*. [https://www.edpdistribuicao.pt/sites/edd/files/2019-02/EDPDistribuição\\_Manual\\_Ligacoes\\_Rede\\_2018\\_9ª\\_edição.pdf](https://www.edpdistribuicao.pt/sites/edd/files/2019-02/EDPDistribuição_Manual_Ligacoes_Rede_2018_9ª_edição.pdf)
- EDP Distribuição. (2019). *Relatório da Qualidade de Serviço 2019*. <https://www.edpdistribuicao.pt/sites/edd/files/2020-07/Relatório da Qualidade de Serviço 2019 vf.pdf>
- Ehsan, A., & Yang, Q. (2018). Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Applied Energy*, 210(January 2018), 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>
- Evangelopoulos, V. A., Georgilakis, P. S., & Hatziaargyriou, N. D. (2016). Optimal operation of smart distribution networks: A review of models, methods and future research. *Electric Power Systems Research*, 140(November 2016), 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.035>
- Mason, O., & Verwoerd, M. (2007). Graph theory and networks in biology. *IET Systems Biology*, 1(2), 89–119. <https://doi.org/10.1049/iet-syb:20060038>
- Panigrahi, P. (2013). *Topological Analysis of Power Grid to Identify Vulnerable Transmission Lines and Nodes*, MSc Dissertation - National Institute of Technology, Rourkela, India.
- REN. (2020). *REN - O Setor Elétrico*. Obtido 4 de Setembro de 2020, de [http://www.ren.pt/pt-PT/o\\_que\\_fazemos/eletricidade/o\\_setor\\_eletrico/#5](http://www.ren.pt/pt-PT/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico/#5)
- Riaz, F., & Ali, K. M. (2011). Applications of graph theory in computer science. *Proceedings - 3rd International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, CICSyN 2011*, 142–145. <https://doi.org/10.1109/CICSyN.2011.40>
- Rosas-Casals, M., Valverde, S., & Solé, R. V. (2007). Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 17(7), 2465–2475. <https://doi.org/10.1142/S0218127407018531>
- Tosic, D. V. (2009). Graph-Theoretic Formulation of Equations for Electrical Circuits with Mathematica. *The IPSI BgD Transactions on Internet Research*, 6(1), 10–17. <http://tir.ipsitransactions.org/2010/January/Paper 03.pdf>

- Trinajstić, N. (2018). *Chemical Graph Theory* (Segunda Edição). Routledge.
- Vaishnavi, V., Kuechler, B., & Petter, S. (2004). *Design Science Research Information Systems. 1*, 1–66. <http://desrist.org/desrist/content/design-science-research-in-information-systems.pdf>
- Xie, B., Qi, C., Ben, H., & Yu, W. (2019). The applications of graph theory in electric network. *Proceedings - 2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, SDPC 2019*, 780–784. <https://doi.org/10.1109/SDPC.2019.00148>